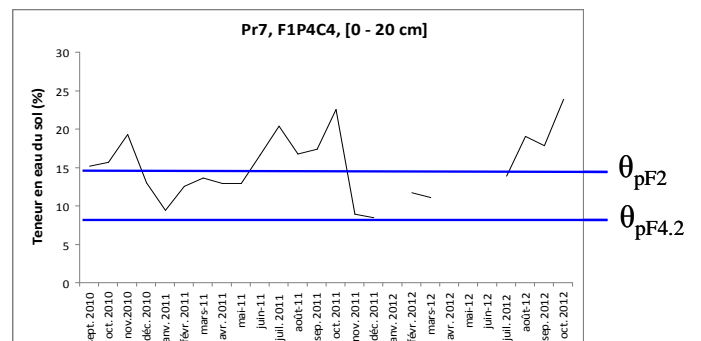
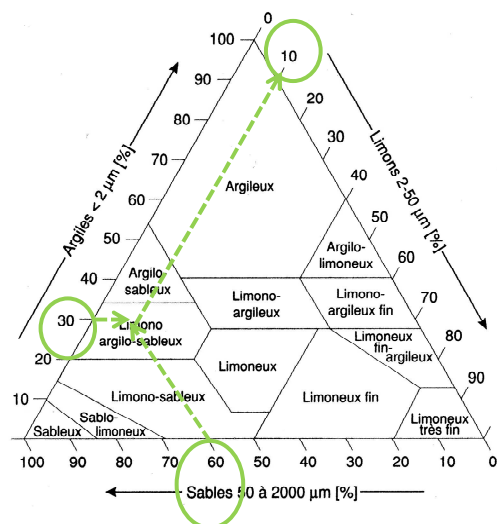




Compte-rendu de mission en République Centrafricaine
24 octobre au 1 novembre 2012
Formation de pédologie et terrain sur le dispositif ARF de Mbaiki



Vincent Freycon
21 décembre 2012

1 - Objectifs

Cette mission avait comme objectif principal de donner une formation de pédologie à des étudiants de M1 « Biodiversité » de l'Université de Bangui. Nous avons profité de cette mission pour compléter des relevés de terrain sur le dispositif forestier de Mbaiki. Ces relevés étaient principalement en lien avec des études réalisées au sein des projets ARF et CoForChange, dont l'une est sur la réserve en eau du sol.

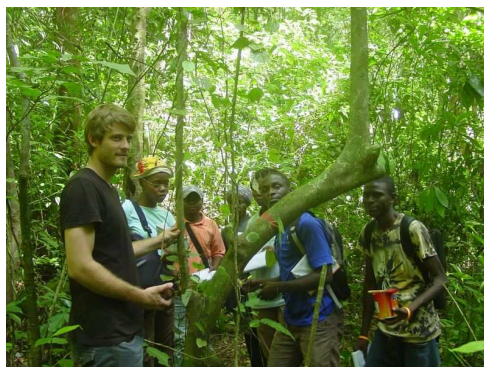
Cette mission a été financée principalement par le SCAC (Xavier Hénaut, Attaché de coopération).

Nous tenons à remercier tout particulièrement François Lanckriet, Volontaire International et coordonnateur du projet Appui à la Recherche Forestière (ARF), qui a parfaitement organisé cette mission et facilité tous ses aspects logistiques. Nos remerciements vont également à toutes les personnes rencontrées au cours de notre séjour pour le temps qu'ils nous ont accordé, notamment Olga Yongo (responsable du master « Biodiversité » de l'Université de Bangui), Fidèle Baya et Fred Godendji (techniciens du projet ARF), Christian Gounel (CoCAC) et Sylvie Gourlet-Fleury (Cirad).

Cette mission s'est « poursuivie » sur Montpellier par un test du protocole qui permet d'estimer au laboratoire la réserve en eau d'un sol. Ce test a été réalisé en partenariat avec Karine Alary et Antoine Delpech (Cirad, laboratoire d'analyses de sols, Montpellier). Nous les remercions pour leur disponibilité et les échanges fructueux qui ont eu lieu durant le test de ce protocole.

Enfin, merci à Nicolas Fauvet (Cirad) pour la réalisation de la carte de la Fig. 1.

Ce rapport présente dans le §.2 le contenu de la formation en pédologie ; dans le §.3 les études centrées sur la réserve en eau des sols du dispositif forestier de Mbaiki (projet ARF) ; et dans le §.4 les autres études de terrain (enracinement, densité apparente, ...). L'annexe 1 reprend le calendrier de la mission.



2 – Formation en pédologie, Université de Bangui

Comme suite à 1^{ère} formation effectuée à l'Université de Bangui en mai 2011 (Freycon 2011), nous avons donné une formation en pédologie à 12 étudiants du Master « Biodiversité » (responsable : Olga Yongo) de l'Université de Bangui dans le cadre de leur année scolaire 2011-2012. Cette formation a été donnée plus précisément à 10 étudiants de M1 et à 2 étudiants de M2 (Annexe 2).

Cette formation s'est déroulée en trois temps :

- cours théoriques (12h)
- travaux pratique sur la colline de Gbaza-Bangui (4h)
- évaluation (3h)

Les cours théoriques (Annexe 3) avaient comme objectif de donner un aperçu des principaux constituants du sol et de leurs propriétés, des sols tropicaux et leurs relations avec la nutrition des plantes. Ces cours ont été très denses puisque les 12 h de cours ont été réparties sur seulement 1 jour et demi. Des parties du cours, notamment lors de la dernière demi-journée, n'ont pas été traitées par manque de temps. Pour faciliter l'assimilation des nouvelles connaissances par les étudiants, nous faisons des « pauses » au cours de la journée, soit sous la forme de résolution de petits exercices directement reliés au cours (réserve en eau du sol, triangle de texture, ...), soit sous la forme de la vision de deux DVD pédagogiques sur « Connaître et comprendre le sol » (La Bouère 2010a, 2010b).

Le TP sur le terrain a été réalisé cette année avant le cours théorique, en même temps que la mise en place d'une parcelle permanente de 0,25 ha sur la colline de Gbaza-bangui (Fig. 1, Annexe 11), une action coordonnée par S. Gourlet-Fleury et O. Yongo. Dans ce cadre, nous avons rappelé quelques principes à connaître avant d'installer une parcelle (i) se positionner sur un globe et sur un plan (Bernard et al. 1998) (ii) le principe d'un GPS et sa précision (Freycon & Fauvet 1998) (iii) la définition et les unités d'une pente.

L'objectif du TP terrain strictement « pédologie », était de rappeler les principales étapes de la formation d'un sol et de décrire les principales caractéristiques d'un sol (texture, structure, couleur, éléments grossiers, racines) que l'on peut observer sur le terrain. Ce TP a été complété ensuite, lors du cours théorique, par la détermination de la couleur avec un code Munsell.

L'évaluation a été réalisée par les 10 étudiants de M1. Elle était divisée en trois parties (Annexes 4, 5 et 6) (i) évaluation des connaissances acquises durant les cours théoriques (ii) évaluation des connaissances acquises durant le TP (iii) résumé d'un article (de vulgarisation scientifique, ou d'une revue à comité de lecture ; français ou anglais) qui avait été transmis à la fin du cours. La correction de l'évaluation a été réalisée à la fin de la mission, les notes ayant été transmises à O. Yongo.

De l'évaluation de cette formation par les étudiants (Annexe 7), il ressort que cette formation a été globalement bien appréciée, notamment la projection des deux DVD qui complète bien le cours. Par contre, les étudiants ont trouvé cette formation trop dense, trop courte et l'évaluation beaucoup trop proche de la fin des cours, avec comme conséquence un temps de préparation de l'évaluation beaucoup trop court. Les étudiants ont unanimement le plus apprécié le TP terrain et les premiers cours (cours n°1 à 3) et le moins apprécié le cours n°6 « Pédogénèse ». Ils ont apprécié de manière très différente (Très bien vs moyen) le cours n°7 « Le sol et l'Homme ».

Les points à améliorer pour l'année 2012 sont les suivants : augmenter le volume des cours théoriques à 16 h ; étaler la formation sur une semaine (ex. cours les matins) pour améliorer l'assimilation du cours ; et laisser une période suffisante entre la fin des cours et l'évaluation.

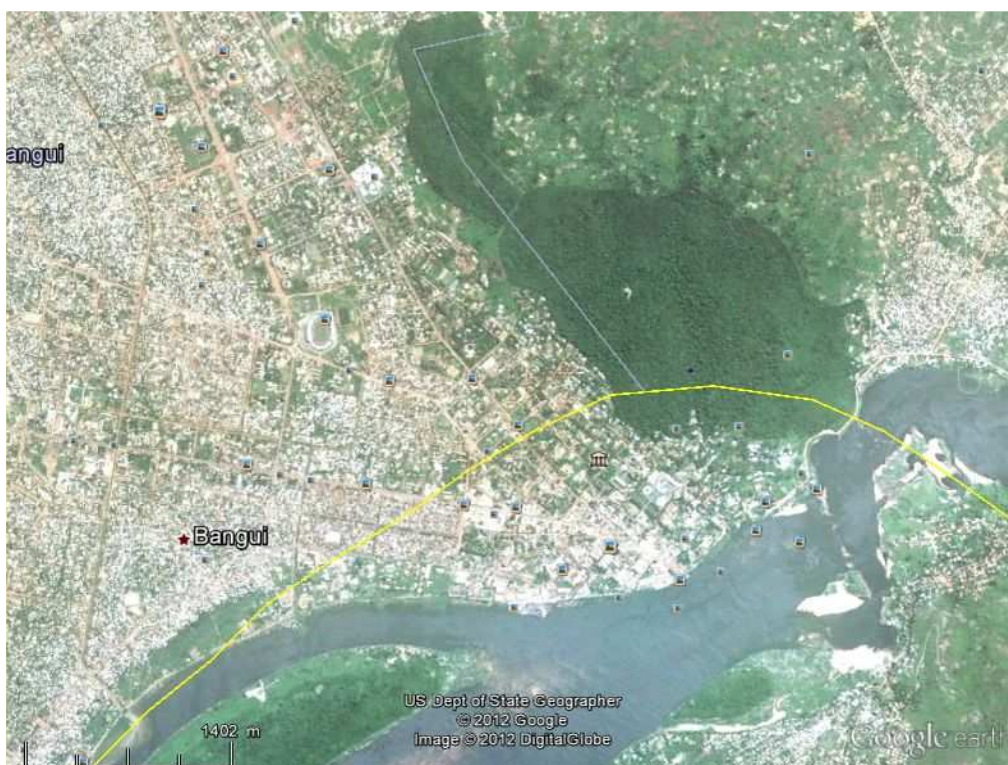
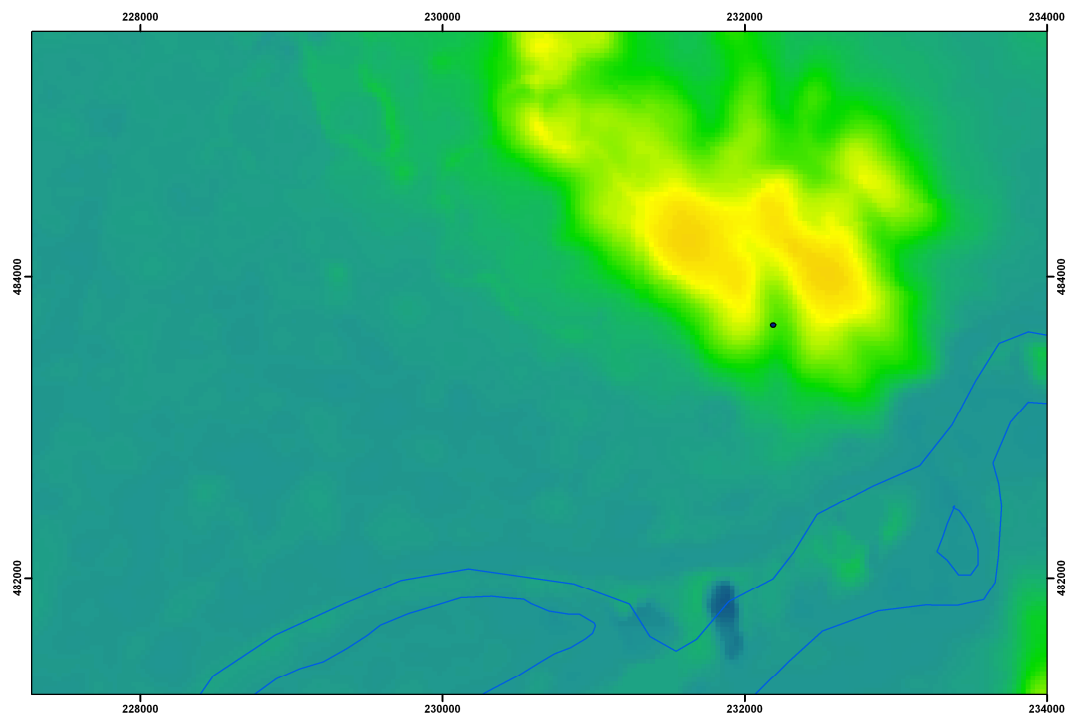


Figure 1 : Parcelle permanente de 0,25 ha de Gbazabangui positionnée (i) en haut, sur une image Aster de 30 m de résolution, (ii) en bas sur une image Google Earth.

3 – Dispositif forestier de Mbaïki : réserve en eau du sol

Dans le cadre du projet CoForChange, un modèle de réserve en eau a été élaboré par S. Rabaud lors d'un stage de M2 (Rabaud, 2011), dans la zone d'étude de ce projet. Pour un sol dont on connaît ses principales caractéristiques (granulométrie, teneur en carbone, densité apparente, épaisseur, réserve en eau maximale calculée à partir des teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement), ce modèle permet de prédire la variation temporelle de la réserve en eau du sol en fonction de la pluviométrie et de l'évapotranspiration (Fig. 2).

3.1. Suivi mensuel de la teneur en eau du sol

Un moyen de valider le modèle de réserve en eau ce modèle est de confronter la réserve en eau prédite par le modèle avec celle estimée à partir de données de terrain. C'est dans ce cadre, qu'a été mis en place sur Mbaïki à partir de septembre 2010 un protocole de suivi de la teneur en eau du sol.

a) Protocole

Il a été décrit précisément dans Gourlet-Fleury et al. (2010). En résumé, il consiste à prélever chaque mois, autour de deux profils de référence Pr7 (F1P4C4) et Pr4 (F1P5C1), des échantillons de sol à différentes profondeurs comprises entre 0 et 120 cm. On détermine alors la teneur en eau de ces échantillons en les pesant juste après qu'ils aient été prélevés puis après séchage (à l'air puis au four). Ce protocole est réalisé par Fidèle Baya. Lors de la mission, nous avons les données des teneurs en eau de septembre 2010 à octobre 2012. Ces données ne sont pas complètes puisque le protocole n'a pas été réalisé durant 3 mois consécutifs (avril à juin 2012) à cause d'une grève de l'équipe ARF. Nous avons comparé ces données de teneur en eau avec celles à la capacité au champ et au point de flétrissement des deux profils (Gourlet-Fleury et al. 2010).

b) Résultat

Nous avons détecté des **données aberrantes** (Tab. 1, Fig. 3) dans les deux cas suivants :

- quand la teneur en eau a beaucoup augmenté d'un mois sur l'autre ... durant la saison sèche
- quand la teneur en eau d'un échantillon était beaucoup plus élevée que celle des autres échantillons du même profil et mesurés le même jour.

Après avoir refait avec F. Baya le protocole de la pesée, nous pensons que ces données aberrantes peuvent provenir des causes suivantes :

- oubli de remise à zéro de la balance avec la tare ($m=72$ g) avant la pesée de l'échantillon (« forêt » et/ou sec) ;
- erreur de retranscription sur la fiche de saisie du poids de l'échantillon lu sur la balance ;

Par contre, nous n'avons pas noté d'erreur entre la fiche de saisie et le fichier Excel. Ces données aberrantes ont été éliminées et considérées ensuite dans le jeu de données comme des données manquantes.

Sur la période étudiée, la teneur en eau a varié entre 7 et 21% pour le profil Pr4 et entre 9 et 27% pour le profil Pr7.

Les valeurs de la teneur en eau sont quasiment toujours supérieures à la teneur en eau au point de flétrissement (pF4.2, Fig. 4, Annexe 8), un seuil limite en dessous duquel les arbres ne peuvent plus s'alimenter en eau. Ce résultat suggère que, durant la période étudiée, les arbres avaient toujours suffisamment d'eau disponible dans le sol

Nous avons observé que la teneur en eau peut être supérieure à celle de la capacité au champ (pF2, Fig. 4, Annexe 8), un seuil limite qui correspond à la teneur en eau maximale que peut retenir un sol. Ce résultat s'observe assez souvent dans les horizons de surface et rarement dans les horizons de profondeur. Ce résultat est surprenant puisque, en théorie, il n'est pas possible. Il pourrait provenir d'un premier **artefact** qui est associé au protocole de prélèvement des échantillons sur le terrain. En effet, si

les échantillons de sol prélevés sur le terrain sont gorgés d'eau, on peut mesurer une teneur en eau supérieure à celle de la capacité au champ.

On peut être confronté à ce cas si les échantillons ont été prélevés (i) après un épisode de forte pluie, mais F. Baya ne se rappelle pas avoir prélevé des échantillons lors d'un tel épisode ; et/ou (ii) sur un sol tassé, par exemple sur le chemin qui délimite la parcelle, ce que nous avons observé sur le terrain. Le tassement réduit en effet l'infiltration de l'eau et favorise la stagnation de l'eau après une pluie dans l'horizon de surface.

c) Recommandations à l'équipe ARF pour le protocole de suivi mensuel de la teneur en eau du sol

Pour éviter des données aberrantes de teneur en eau du sol et un éventuel artefact lié au protocole de prélèvement, nous faisons les recommandations suivantes à l'équipe ARF :

Terrain

- Ne pas prélever juste après une forte pluie. Prélever 24 h après une forte pluie, tout en décalant seulement de 2-3 jours la date de prélèvement pour respecter la fréquence mensuelle des prélèvements. Si ce n'est pas possible et que certains échantillons sont gorgés d'eau (saison des pluies), le noter sur la fiche manuscrite de pesée.
- Ne pas prélever sur un sol tassé, donc éviter le chemin qui délimite les parcelles. Nous rappelons que la surface de prélèvement peut être étendue autour de chacune des deux fosses (notamment dans les zones tampon), pourvu que l'on reste dans la même unité de sol (Fig. 5).

Mesure de l'humidité :

- ne pas oublier de mettre à zéro la balance, une fois que la tare ait été placée
- garder la fiche manuscrite de pesée
- garder les échantillons secs qui ont été pesés. Saisir au plus vite les poids « forêts » et « sec » pour calculer l'humidité. Si les valeurs d'humidité sont normales ($< 30\%$), jeter les échantillons secs. Si les teneurs en eau sont anormales ($> 30\%$), repeser les échantillons secs puis les jeter.

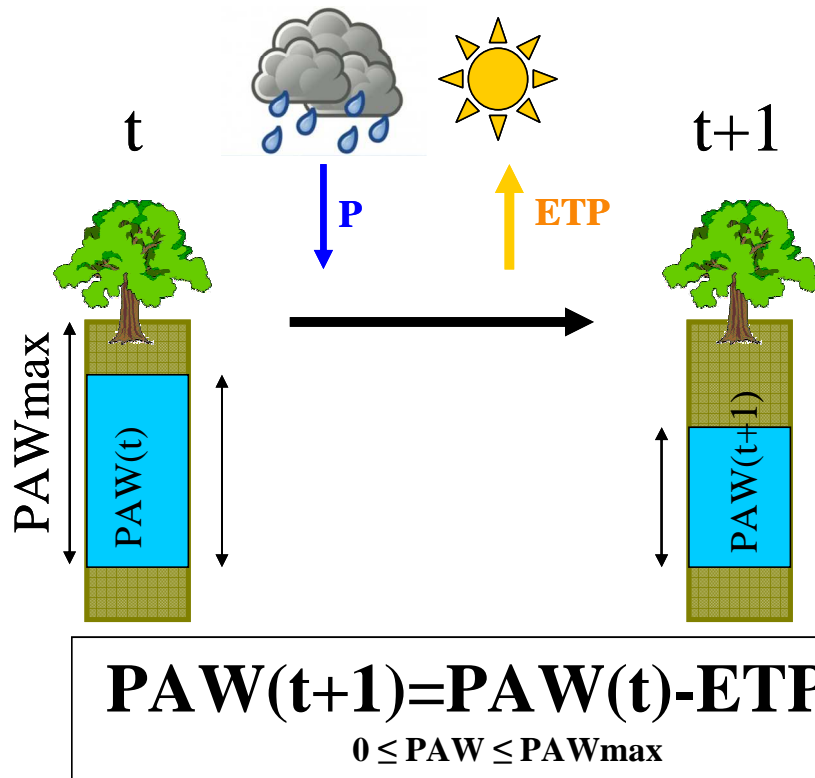


Figure 2 : Schéma du modèle de réserve en eau disponible du sol.
 PAW (Plant Available soil Water) = eau disponible du sol, PAWmax = eau disponible du sol maximale,
 P = précipitations, ETP = Evapotranspiration potentielle
 Figure tirée de Rabaud (2011)

Tableau 1 : Détection de valeurs aberrantes de la teneur en eau du sol (θ)
Les cas 1 à 5 sont illustrés dans la Figure 2.

Profil	Parcelle	Cas	Prof.	Date	Poids forêt	Poids sec	Teneur en eau θ				Pluvio	Valeurs aberrantes	
							$\theta(t)$ aberrante	$\theta(t)$ autres prof.	$\theta(t-1)$	$\theta(t+1)$		(t-1) à (t)	Détection
Pr7	F1P4C4	1	50 - 60 cm	13/09/2011	816	502	63	16 à 18	15	16	160	1	1
Pr7	F1P4C4	2	0 - 20 cm	14/01/2012	358	244	47	NA	8	12	3	2	2
Pr7	F1P4C4	2	30 - 40 cm	14/01/2012	354	242	46	NA	23	11	3	2	2
Pr7	F1P4C4	2	50 - 60 cm	14/01/2012	360	232	55	NA	22	11	3	2	2
Pr7	F1P4C4	2	70 - 80 cm	14/01/2012	366	252	45	NA	25	27	3	2	2
Pr7	F1P4C4	2	90 - 100 cm	14/01/2012	356	234	52	NA	19	12	3	2	2
Pr7	F1P4C4	2	110 - 120 cm	14/01/2012	320	224	43	NA	25	11	3	2	2
Pr4	F1P5C1	3	90 - 100 cm	18/07/2011	542	402	35	14 à 17	14	15	147	1	2
Pr4	F1P5C1	4	50 - 60 cm	17/12/2011	476	366	30	12 à 17	13	9	36	1	3
Pr4	F1P5C1	4	70 - 80 cm	17/12/2011	424	330	28	12 à 17	14	9	36	1	3
Pr4	F1P5C1	4	90 - 100 cm	17/12/2011	520	410	27	12 à 17	15	10	36	1	3
Pr4	F1P5C1	5	50 - 60 cm	13/02/2012	408	310	32	9 à 10	9	15	32	1	2
Pr4	F1P5C1	5	70 - 80 cm	13/02/2012	368	274	34	9 à 10	9	10	32	1	2
Pr4	F1P5C1	5	90 - 100 cm	13/02/2012	334	268	25	9 à 10	10	12	32	1	4
Pr4	F1P5C1	5	110 - 120 cm	13/02/2012	322	266	21	9 à 10	11	13	32	1	4

Détection des valeurs aberrantes	
Code	Libellé
1	$\theta(t) \gg \theta(t)$ des autres profondeurs
2	$\theta(t) \gg \theta(t-1)$ alors que $P(t) - P(t-1)$ est faible

Cause probable des valeurs aberrantes	
Code	Libellé
1	Poids frais aberrant
2	Tare poids forêt non remise à 0
3	Tare poids sec non remise à 0
4	Cause non connue

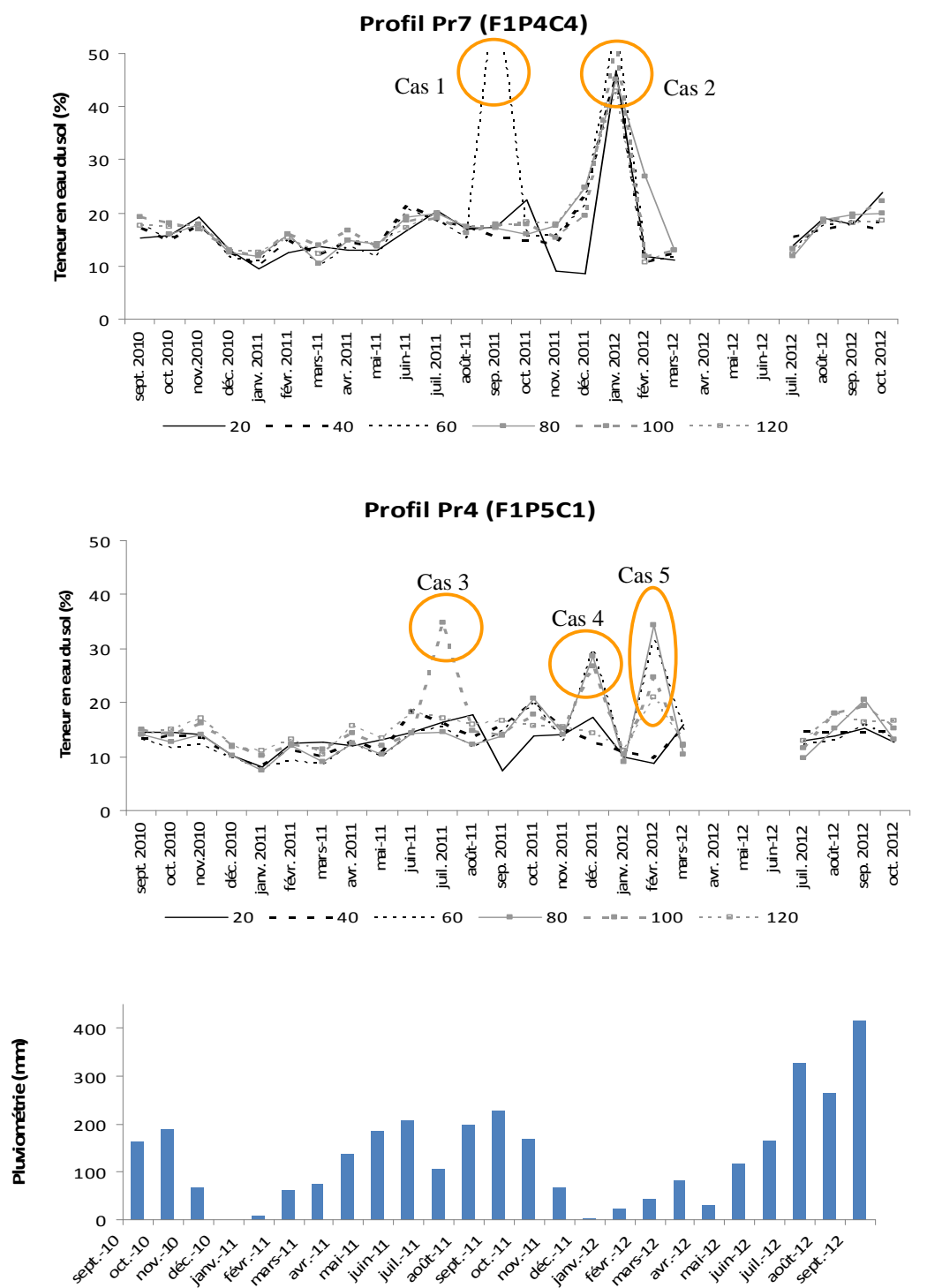


Figure 3 : Détection de valeurs aberrantes de la teneur en eau du sol
Les cas 1 à 5 font référence au Tableau 1

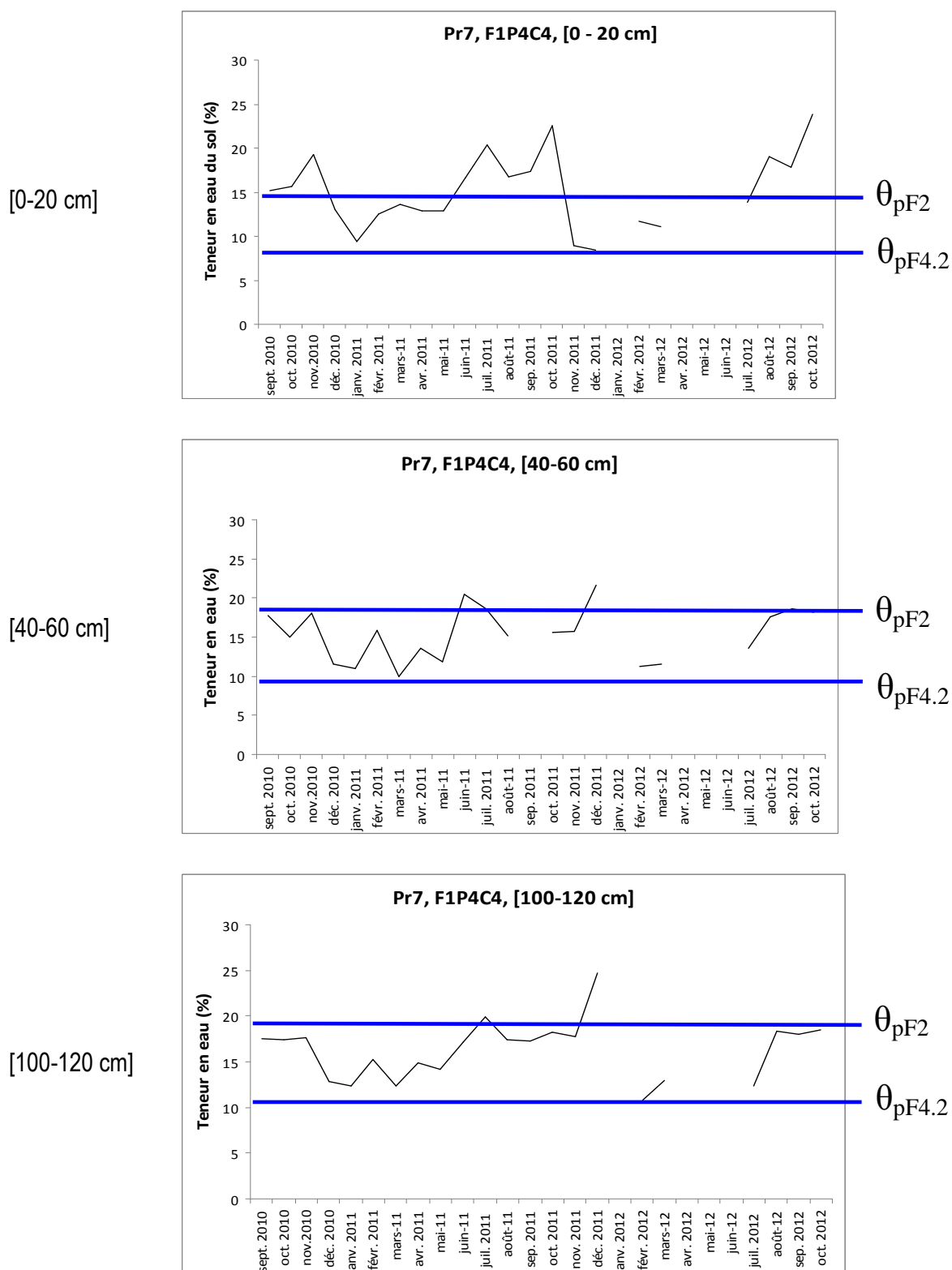
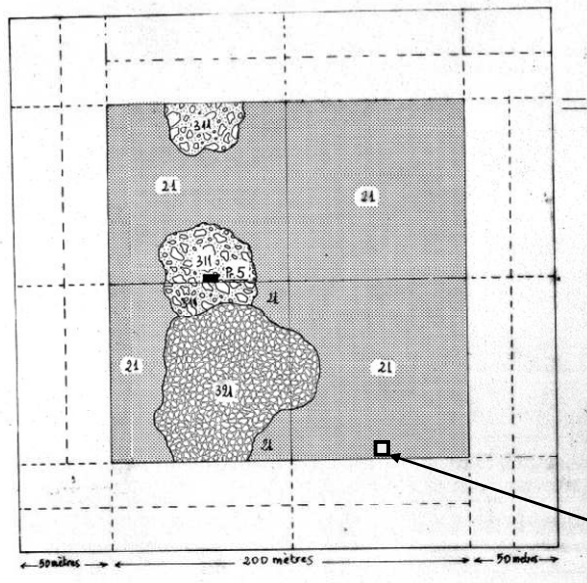


Figure 4 : Variation de la teneur en eau mensuelle pour trois profondeurs du profil Pr7 et comparaison avec les valeurs seuil à la capacité au champ (θ_{pF2}) et au point de flétrissement ($\theta_{pF4.2}$).
Les données complètes se trouvent dans l'Annexe 8.

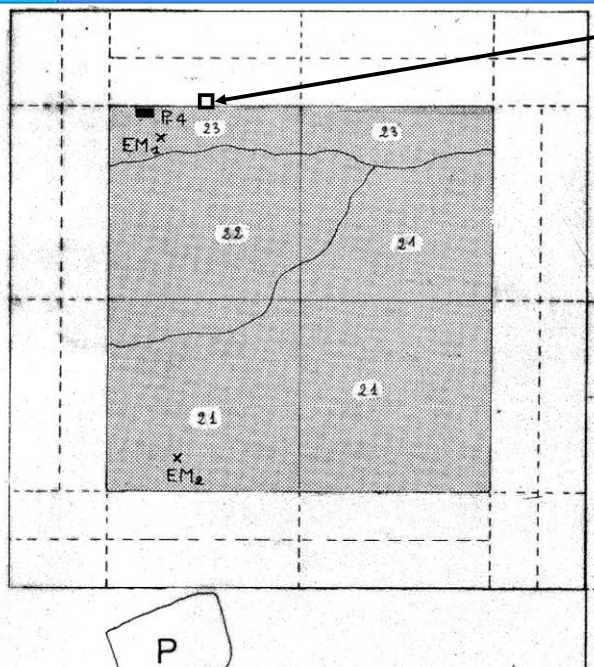
Boukoko, Parcelle 4



Fosse Pr7



Boukoko, Parcelle 5



Fosse Pr4



Figure 5 : Position des fosses Pr7 (F1P4C4) et Pr4 (F1P5C1) sur les unités de sol définies par Freytet (1992).

3.2. Influence de la déstructuration des échantillons sur les mesures de la capacité au champ et du point de flétrissement.

Nous avons observé que la teneur en eau des sols de Mbaiki peut être supérieure à celle de la capacité au champ (pF_2), ce qui est en théorie impossible. Nous avons vu dans le §.3.1 que ce résultat pourrait provenir d'un premier artefact qui est lié à des échantillons prélevés qui sont gorgés d'eau. Ce résultat pourrait aussi provenir d'un **deuxième artefact** qui est lié au mode de prélèvement des échantillons de sol sur lesquels ont été mesurées au laboratoire les teneurs en eau à la capacité au champ (θ_{pF_2}) et au point de flétrissement ($\theta_{pF_{4.2}}$) (Gourlet-Fleury et al. 2010). En effet, entre le terrain et la mesure au laboratoire, ces échantillons de sol ont été « perturbés » (échantillons mis en vrac dans un sac plastique puis tamisés). Nous supposons donc que mesurer la teneur en eau sur ces échantillons « perturbés » crée un artefact en déstructurant le sol (structure non conservée, macroporosité détruite), ce qui peut avoir comme conséquence de sous-estimer l'humidité du sol à la capacité au champ. Cet artefact serait plus net sur les horizons de surface, plus riche en matière organique, car ils possèdent une structure grumeleuse plus fragile et une macroporosité plus développée qu'en profondeur. Par contre, ces échantillons « perturbés » ne créeraient pas d'artefact pour la mesure de la teneur en eau au point de flétrissement, puisque la microporosité du sol n'est pas détruite. Nous avons alors réalisé un protocole pour tester cet artefact.

a) Hypothèses testées

Hyp. 1 : Des échantillons de sols « perturbés » sous-estiment la teneur en eau à la capacité au champ (pF_2) par rapport à des échantillons « non perturbés ». Cette sous-estimation est nette pour les horizons de surface et s'estompe pour les échantillons de profondeur.

Hyp. 2 : Des échantillons de sols « perturbés » ne sous-estiment pas la teneur en eau au point de flétrissement ($pF_{4.2}$) par rapport à des échantillons « non perturbés ».

b) Protocole expérimental

Nous avons prélevé 9 couples d'échantillons de sols (« perturbés », « non perturbés ») sur les deux profils Pr4 et Pr7, à différentes profondeurs comprises entre [0-5 cm] et [60-65 cm] (Annexe 9).

Un échantillon « perturbé » correspond à du sol qui a été prélevé avec une truelle, mis dans un sac plastique puis tamisé au laboratoire à 2 mm.

Un échantillon « non perturbé » correspond à du sol qui a été prélevé sous la forme d'un bloc rectangulaire qui conserve la structure du sol. Ce bloc de sol a été placé dans une boîte (de fortune - boîte d'allumettes - ce protocole ayant été conçu au dernier moment). Les différentes boîtes des 9 échantillons « non perturbés » ont été placées et calées dans une boîte en plastique fermée afin de ne pas être trop perturbés durant le voyage. Au laboratoire, ces échantillons n'ont pas été tamisés et ont été conservés au frigo.

Au laboratoire (Cirad, Montpellier), nous avons mesuré la teneur en eau à pF_2 (2 répétitions) et à $pF_{4.2}$ (2 répétitions) des échantillons « perturbés » ($n=9$) et des échantillons « non perturbés » ($n=9$).

Le protocole était le suivant :

- les échantillons de sol sont mis dans des anneaux. Ces anneaux sont placés sur une plaque en céramique de 1 bar ou 15 bar.
- La plaque en céramique est recouverte par de l'eau durant 24h avec un niveau d'eau qui atteint la demi-hauteur des anneaux → le sol s'imprègne d'eau par capillarité (Photo 1)
- La plaque en céramique est mise dans une mini-chambre à pression durant 72h, soit avec une pression de 0,1 bar (pF_2), soit avec une pression de 15,5 bar ($pF_{4.2}$).
- Les sols sont pesés après la sortie de la mini-chambre à pression (m_1)
- Les sols sont mis à l'étuve durant 24 h à 105°C.
- Les sols sont pesés à l'état sec (m_2)
- Calcul de la teneur en eau = $(m_1 - m_2) / m_2 * 100$

c) Résultats

Observations lors du protocole de mesure au labo

Dès le contact des échantillons avec l'eau, certains échantillons étaient presque immédiatement imprégnés d'eau contrairement à d'autres. Nous avons retrouvé cette différence d'imprégnation même 24 h après le contact des échantillons avec l'eau : la plupart des échantillons étaient complètement imprégnés d'eau, notamment les échantillons « perturbés » qui avaient été tamisés. Par contre, 12 échantillons parmi l'ensemble des 76 échantillons étaient peu ou moyennement imprégnés d'eau : à l'exception d'un échantillon, ils correspondaient à des échantillons « non perturbés » de sol de surface [0-5 cm] et [10-15 cm] (Photo 1, Fig. 6).

On peut supposer que cette mauvaise imprégnation en eau de ces échantillons est due au caractère hydrophobe d'un sol. Ce caractère est principalement dû à des composants de la matière organique du sol (Doerr *et al.* 2000). Bien que ce caractère ait été au départ mis en évidence pour des sols sableux de climat sec, il apparaît que des sols avec des textures plus fines et/ou de climat humide sont aussi concernés (Jaramillo *et al.* 2000). Le caractère hydrophobe d'un sol n'est pas statique, mais il évolue avec le temps, notamment en fonction de l'état d'humidité d'un sol : il apparaît en-dessous d'une valeur-seuil d'humidité et s'atténue, voire disparaît quand l'humidité du sol redevient supérieure à cette valeur (Dekker & Ritsema 2000, Doerr & Thomas 2000). Nos observations sont cohérentes avec la bibliographie, puisque nous avons observé une mauvaise imprégnation d'eau pour les sols de surface « non perturbés » qui sont a priori les plus riches en matière organique et les plus sableux. Le conditionnement de ces sols dans des boîtes d'allumettes en carton et non hermétiques ont absorbé une partie de l'humidité du sol initial, ce qui a pu favoriser l'apparition du caractère hydrophobe. Par contre, nous ne comprenons pas encore pourquoi ce caractère disparaît lorsque les échantillons sont « perturbés ». Enfin, ce caractère hydrophobe de ces sols forestiers de Mbaiki serait assez original puisque, à notre connaissance, il n'a pas été décrit pour des sols tropicaux humides.

Pour revenir à notre protocole, les conséquences sont les suivantes :

- comme nous n'avons pas essayé de réhumecter les 12 échantillons qui étaient peu ou moyennement imprégnés, on peut s'attendre à ce que la teneur en eau à la capacité au champ soit sous-estimée.
- il est important de mesurer aussi l'humidité des échantillons pour essayer de détecter la valeur-seuil en-dessous de laquelle le caractère hydrophobe apparaît pour ces sols.

Analyse des données

A la capacité au champ (pF2), pour une profondeur donnée, nous n'avons pas observé de différences nettes entre les échantillons « perturbés » et les échantillons « non perturbés ». Une variabilité « intra » importante a certainement masqué ces différences.

Pour le profil Pr4 (Fig. 6a), cette variabilité intra est importante pour les échantillons "non perturbés" des deux premiers horizons de surface [0-5 cm] et [10-15 cm], ceux pour lesquels nous avons observé une mauvaise imprégnation d'eau. Cette variabilité est donc certainement expliquée par cet artefact. Pour le profil Pr7 (Fig. 6b), cette variabilité intra est la plus importante pour les échantillons "perturbés", ce qui est surprenant puisque, a priori, ces échantillons issus d'un sol tamisé sont plus homogènes que ceux issus d'un sol "non perturbé".

Au point de flétrissement (pF4.2), pour une profondeur donnée, nous n'avons pas observé de différences entre les échantillons "non perturbés" et les échantillons "perturbés", tout en ayant une variabilité « intra » faible (Fig. 6c, 6d).

d) Suite

Cette 1^{ère} expérience suggère (i) la robustesse de la mesure au laboratoire de la teneur en eau au point de flétrissement (pF4.2) (ii) la sensibilité de la mesure au laboratoire de la teneur en eau à la capacité au champ (pF2). Cette sensibilité est certainement due à la plus ou moins bonne imprégnation en eau des échantillons de sol qui ont un caractère hydrophobe et/ou à la nature des échantillons « perturbés » vs « non perturbés ».

Une 2^{ème} expérience, cette fois en forçant l'imprégnation en eau de tous les échantillons, devrait confirmer ces résultats.



Photo 1 : « Galette » de 21 échantillons de sol (anneaux 22 à 42) sur une plaque en céramique, 24 h après avoir été imprégnés d'eau et juste avant d'être placés dans une mini-chambre à pression pour mesurer leur teneur en eau à pF2. Noter la différence d'imprégnation d'eau suivant la nature des échantillons. Pour un même profil (Pr4) et des profondeurs identiques ([0-5 cm] et [10-15 cm]), les échantillons « perturbés » sont bien imprégnés (anneaux 28 et 29) alors que les échantillons « non perturbés » sont mal imprégnés (anneaux 38 et 39).

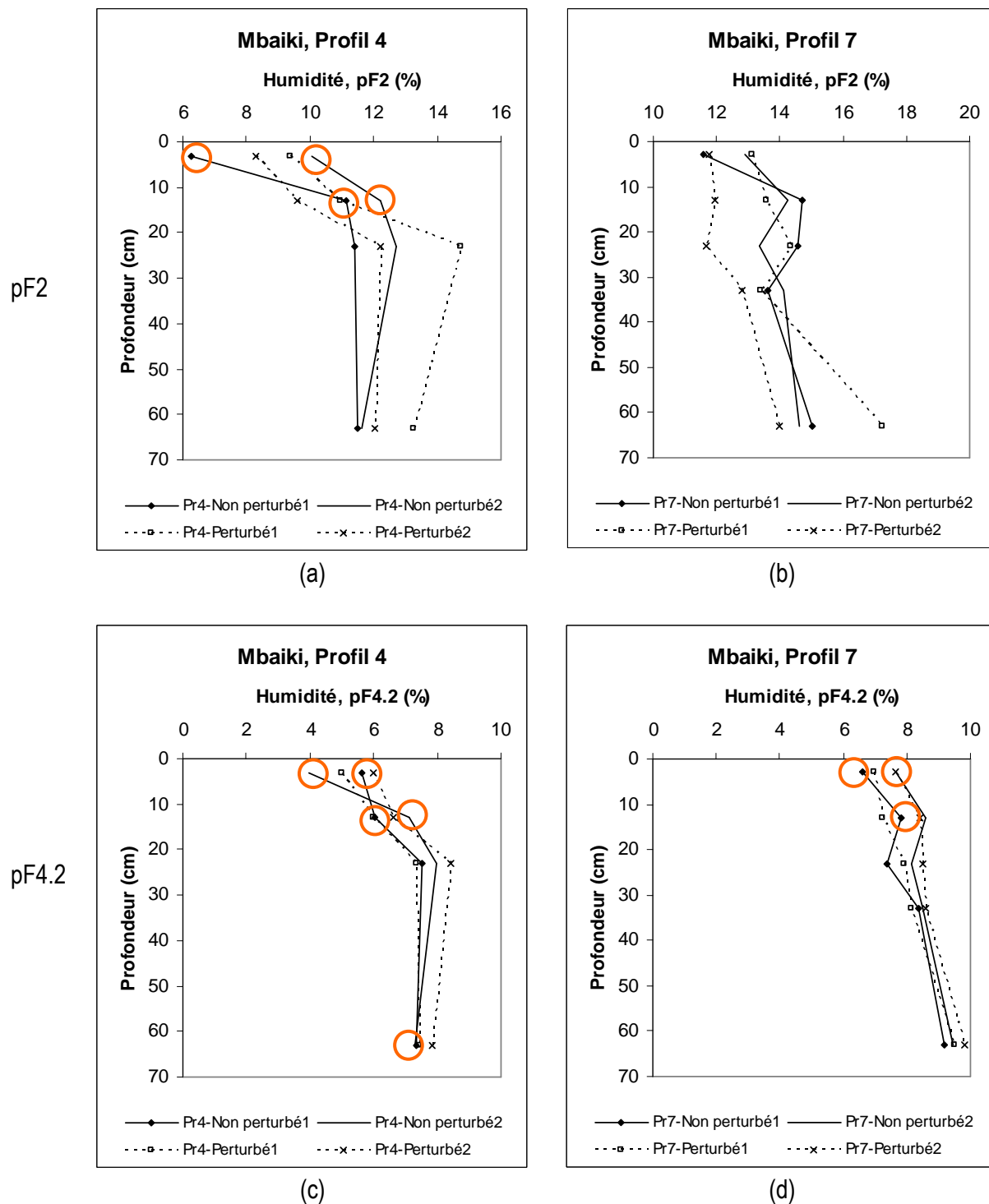


Figure 6 : Teneur en eau à la capacité au champ (pF2) et au point de flétrissement (pF4.2) des profils Pr4 et Pr7 en fonction du type d'échantillon (« perturbé » vs « non perturbé ») et de la profondeur. Les échantillons qui ont été peu ou moyennement imprégnés d'eau sont entourés d'un cercle : leur teneur en eau a été alors certainement sous-estimée.

4 – Dispositif forestier de Mbaïki : autres études

4.1. Densité apparente du sol

Contexte

La densité apparente (ou masse volumique apparente d'un sol) est une des mesures nécessaire pour calculer la réserve en eau d'un sol (passer d'une teneur en eau à un volume d'eau) et le stock de carbone d'un sol (passer d'une teneur en carbone à un stock de carbone). Elle est souvent négligée et considérée comme constante (=1,4) même si on sait qu'elle est plus faible dans les horizons de surface. De plus, pour un profil et une profondeur donnés, jusqu'à présent, nous avons effectué des mesures uniques et ne connaissons donc pas la variabilité de cette mesure.

Objectif

Estimer la variabilité de la mesure de la densité apparente pour un horizon donné et suivant un gradient de profondeur.

Protocole

Prélèvement dans des cylindres de 100 cm³ (V) de 21 échantillons de sol (Annexe 9) :

- 15 échantillons de sol du profil Pr7 à cinq profondeurs comprises entre [0-5 cm] et [60-65 cm], avec 3 répétitions par profondeur
- 6 échantillons de sol du profil Pr4 à cinq profondeurs comprises entre [0-5cm] et [60-65 cm], avec 1 répétition par profondeur (sauf [0-5 cm] riche en racines : 2 répétitions).

Séchage des échantillons à l'étuve et pesée à l'état sec (m1)

Calcul de la densité apparente = $m1/V$ labo

Résultats

Les résultats n'avaient pas été encore reçus lors de la rédaction de la version finale de ce rapport. A suivre ...

4.2. Enracinement

Dans le cadre du projet CoForChange, une étude sur l'enracinement a été réalisée par C. Wonkam lors d'un stage de M1 (Wonkam, 2011). L'enracinement a été peu étudié en forêt tropicale alors que c'est un facteur-clé qui est utilisé dans les modèles de réserve en eau du sol et, plus généralement, dans les modèles qui cherchent à prédire le comportement de la forêt face aux futurs changements climatiques. Cette étude avait comme objectif d'étudier l'enracinement en profondeur du Sapelli sur deux types de sol : sol sablo-argileux de Mbaiki vs sols sableux de Ngotto. Lors de l'étude de Wonkam (2011), des échantillons de sol avaient été prélevés sur Ngotto pour estimer la biomasse racinaire de l'horizon de surface, mais ce prélèvement n'avait pas été réalisé sur Mbaiki.

Objectif

Estimer la biomasse racinaire de l'horizon de surface [0-15 cm] à proximité d'un Sapelli étudié par Wonkam (2011).

Protocole

Nous nous sommes placés à côté de la fosse 2 qui avait été étudiée par Wonkam (2011). Cette fosse avait été ouverte jusqu'à 6m de profondeur, à 50 cm d'un Sapelli.

Nous avons cherché à prélever du sol avec une tarière racinaire, entre la surface et 15 cm de profondeur, en se plaçant à 50 cm puis à 80 cm du Sapelli, sur le côté opposé de la fosse (Fig. 7).

Nous avons effectué 8 tentatives, mais chaque fois nous avons rencontré un obstacle avant d'avoir atteint 15 cm de profondeur. Nous n'avons donc pas pu prélever du sol comme nous l'avions prévu pour estimer la biomasse racinaire du sol de surface [0-15 cm] et la comparer à celle de Ngotto.

Résultats

L'obstacle rencontré était en général une racine horizontale d'au moins 1 cm de diamètre. Dans un seul cas, il semblait correspondre à un horizon très compact (Tab. 2). Ce protocole suggère que le Sapelli a un système de racines traçantes vers 10 cm de profondeur. Ces racines traçantes s'observent bien sur la face de cette fosse 2 (Photo 2). Ce résultat est cohérent avec l'étude de Wonkam (2011) qui montrait que sur la fosse 2, en considérant les racines sur 3 m de profondeur, 30% de la surface racinaire (un indicateur approchant la biomasse racinaire) des racines moyennes et 37% de la surface terrière des grosses racines se trouvait dans les 10 premiers cm (Fig. 8).

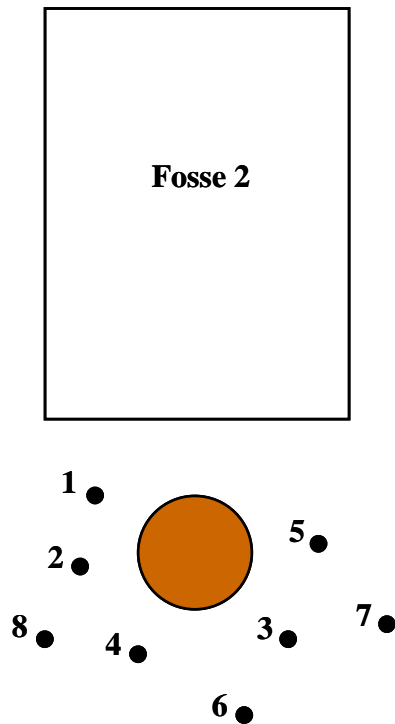


Figure 7 : Localisation de tentative de prélèvements de sol avec une tarière racinaire pour estimer la biomasse racinaire à [0-15 cm] de profondeur.

Tableau 2 : Tentative de prélèvement de sol avec une tarière racinaire. Profondeurs et causes du blocage tarière

Essai tarière	Distance au Sapelli	Blocage tarière	
		Profondeur (cm)	Cause
1	50 cm	12	Racine
2	50 cm	9	Racine, Ø=6 cm
3	50 cm	9	Racine, Ø=1 cm
4	50 cm	10	Racine, Ø=3 cm
5	50 cm	6	Racine, Ø=2 cm
6	80 cm	6	Racine, Ø=1 cm
7	80 cm	11	Horizon compact
8	80 cm	8	Racine, Ø=5 cm



Photo 2 : Face de la fosse 2 de Mbaiki illustrant la présence de racines traçantes vers 10 cm de profondeur

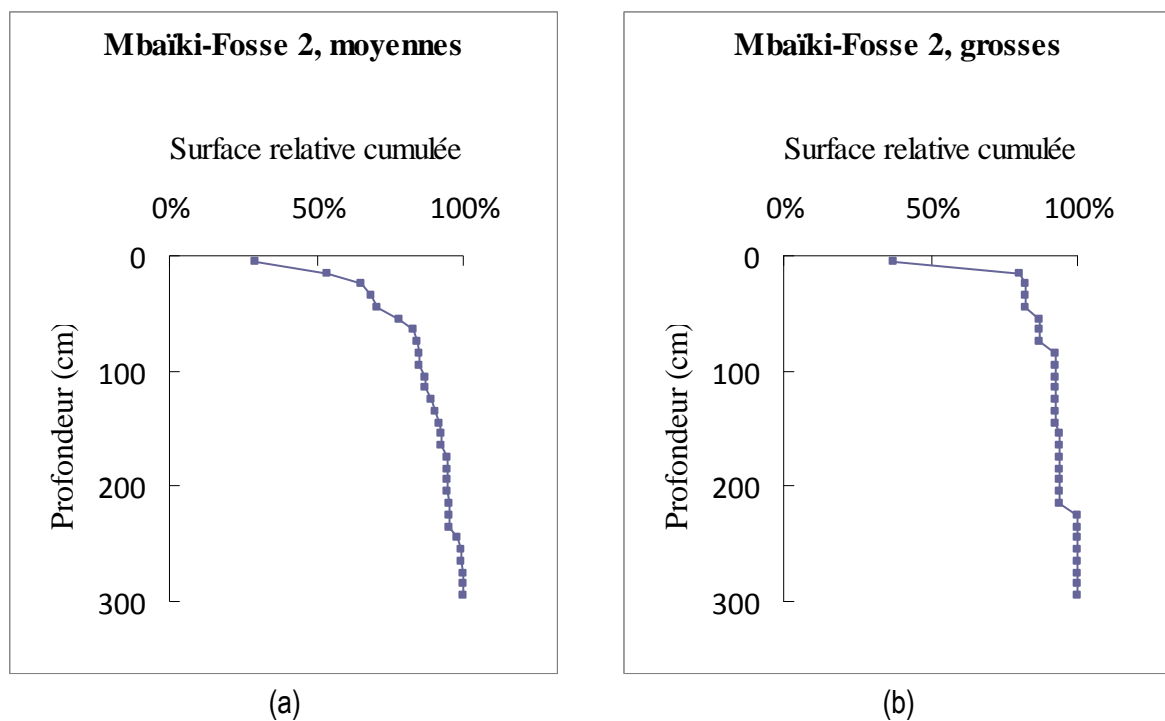


Figure 8 : Surface relative cumulée des racines (a) moyennes (b) et grosses de la fosse 2 de Mbaiki en fonction de la profondeur

4.3. Profondeur des nappes

La profondeur des nappes phréatiques est un des thèmes étudiés dans le cadre du projet CoForChange. Associé à l'étude sur la profondeur d'enracinement des arbres, on peut en effet prédire si les arbres ont accès à la nappe phréatique, notamment durant la saison sèche.

Protocole

Depuis décembre 2010, la profondeur de la nappe est mesurée deux fois par mois par F. Baya, avec une sonde lumineuse, dans 4 puits du village de Mbaiki (Laraque & Freycon 2010). Ces puits sont situés entre 458 et 468 m d'altitude. Trois de ces puits sont sur plus ou moins loin d'un cours d'eau (Ipembé), leur différence de dénivelé avec ce cours d'eau étant compris entre 3 et 8 m (Fig. 9). Le puits P1 n'est quasiment plus utilisé contrairement au puits P4 qui se trouve dans la concession de F. Baya. Nous avons un jeu de données qui couvrait la période de décembre 2010 à octobre 2012.

Résultat

Le puits P4 présente une donnée anormale en sept. 2011 puisque la nappe était la plus profonde pendant la saison des pluies. Cette donnée s'explique par une augmentation exceptionnelle ce mois-ci du nombre d'habitants qui logeaient dans cette concession.

A l'exception de cette donnée anormale, la profondeur de la nappe a varié entre 2,20 m et 8,50 m suivant les puits et la saison (Tab. 3, Fig. 10). La profondeur de la nappe est la plus haute pour les puits qui sont le plus proche du cours d'eau. A l'exception du puits P4, la nappe varie d'environ 2,50 m entre sa profondeur maximale en saison sèche et sa profondeur minimale en saison des pluies. La variation de la profondeur de la nappe du puits P4 est d'environ 5 m entre ces deux saisons.

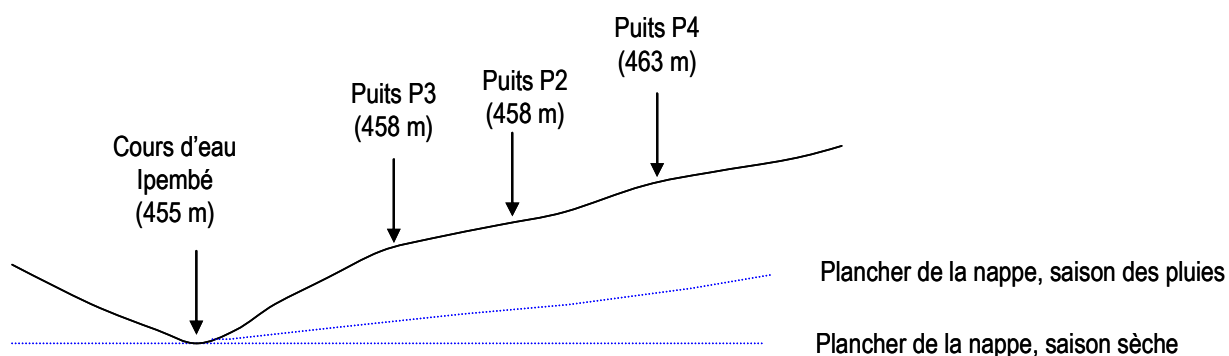


Figure 9 : Illustration du plancher de la nappe liée au cours d'eau Ipembé suivant la saison et la position topographique
(Figure reprise de Laraque & Freycon 2010 et modifiée)

Tableau 3 : Profondeurs maximale et minimale de la nappe suivant les puits

Puits	Profondeur (m)		
	Maximale	Minimale	Différence
P1	8,20	5,70	2,50
P2	5,60	3,00	2,40
P3	4,80	2,20	2,60
P4	8,50	3,40	5,10

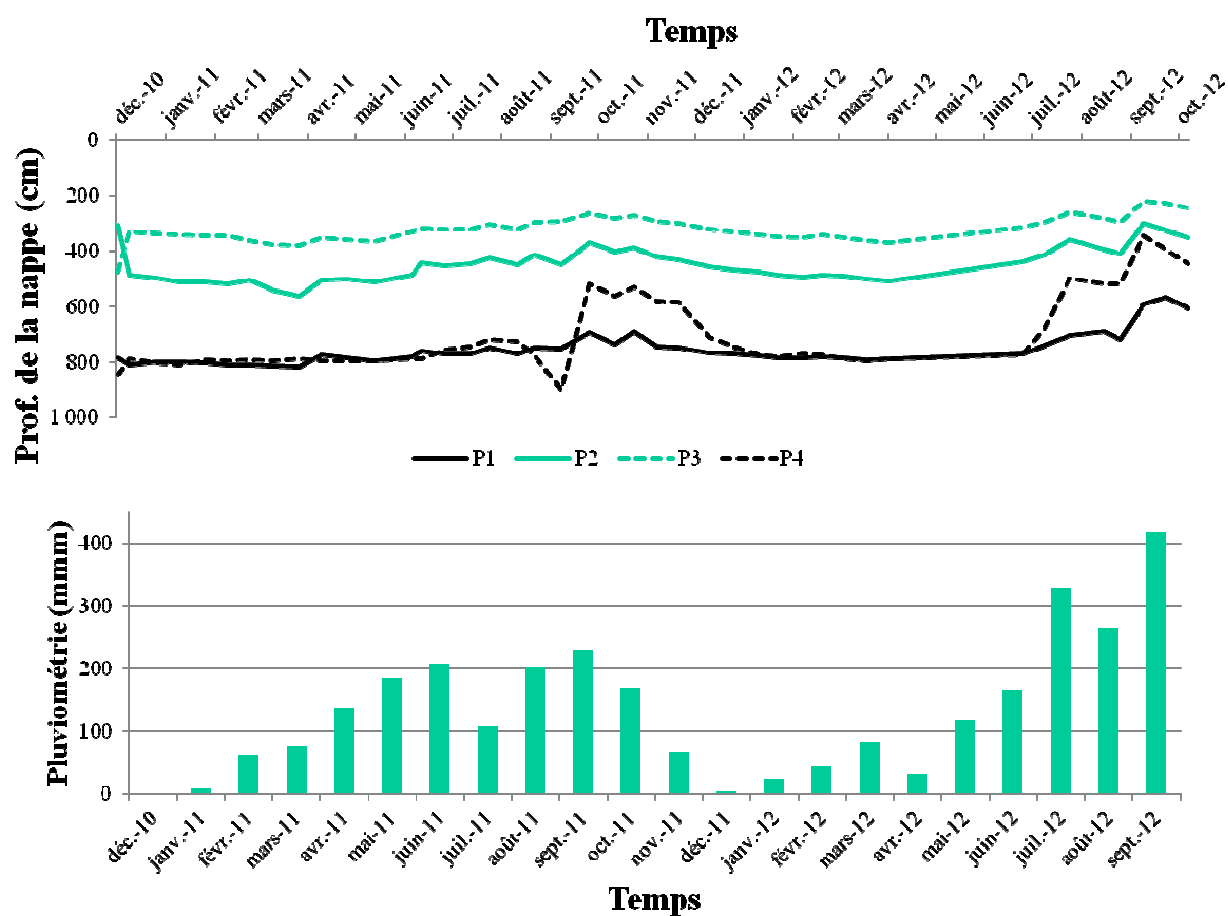


Figure 10 : Variation de la profondeur de la nappe de quatre puits en fonction de la pluviométrie

4.4. Histoire des forêts

Nous avons profité de cette mission pour prélever de nouveau des échantillons de sol sur les profils Pr4 et Pr7, à différentes profondeurs, afin de mesurer la composition isotopique du carbone et de détecter un éventuel changement de végétation (plantes en C3 vs plantes en C4) dans le passé. De retour sur Montpellier, ces échantillons ont été transmis à l'Isem (Annexe 10).

4.5. Plantations de Teck

Nous avons observé rapidement les sols de la plantation de Teck qui se trouvent sur le versant d'une colline, juste en amont du bâtiment du projet ARF. Le sol brun-rouge est très riche en graviers et cailloux de cuirasse qui apparaissent entre la surface et 20 cm de profondeur. Ces graviers et cailloux de cuirasse sont certainement issus d'une cuirasse démantelée qui, par inversion de relief, est aujourd'hui localisée sur les points hauts du relief (Fig. 11).

4.6. Station météo

Avec F. Lanckriet et S. Gourlet-Fleury, nous avons essayé de monter une station-météo qui doit être installée à côté du bâtiment du projet ARF. Cette tentative s'est soldée par un échec et ... un fou-rire !

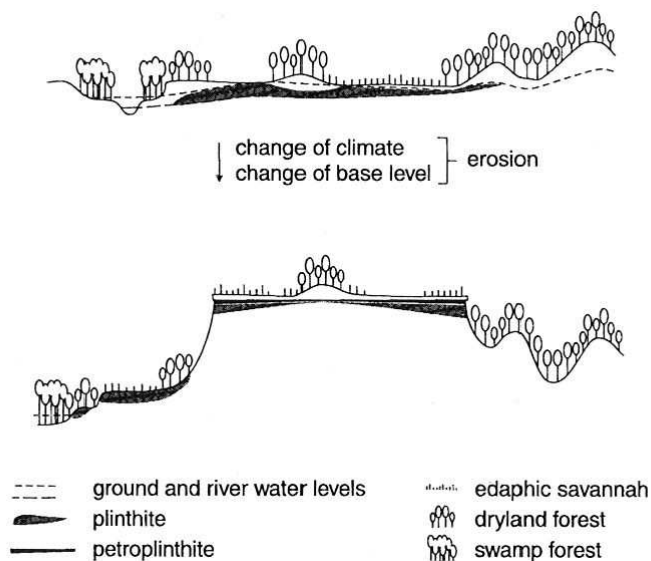


Figure 11 : Schéma illustrant l'inversion de relief d'une cuirasse

Bibliographie

- Bernard, C., Freycon, V., Gazull, L., Lo Seen, D., Trébuchon, J.-F. (1997). Le géoréférencement ... ou comment maîtriser l'intégration de données multi-sources dans un S.I.G. Document CIRAD-Forêt/Stratégis, 50 p. + Annexes
- Dekker, L.W. & Ritsema, C.J. (2000) Wetting patterns and moisture variability in water repellent Dutch soils. *Journal of Hydrology*, 231, 148-164.
- Doerr, S.H., Shakesby, R.A., & Walsh, R.P.D. (2000) Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews*, 51, 33-65.
- Doerr, S.H. & Thomas, A.D. (2000) The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soils in Portugal. *Journal of Hydrology*, 231, 134-147.
- Freycon, V. (2011). Compte-rendu de mission en République Centrafricaine, 18 mai au 2 juin 2011, Formation de pédologie et encadrement du stage de C. Wonkam. 10 p. + Annexes, Cirad, Montpellier.
- Freycon, V., Fauvet, N. (1998). Les GPS. De l'acquisition des données à leur intégration dans un S.I.G. Série FORAFRI, Document n° 10, 53 p. + Annexes.
- Freytet, F. (1992) Annexe n°1 : Etude pédologique. In Rapport d'activité (février 1991 - avril 1992). Travaux de recherche sur l'aménagement des forêts denses humides. Dispositif de Boukoko - La Lolé, M'Baïki (Lobaye) (eds F. Freytet & G. Tandeau de Marsac). Ministère des eaux et forêts, ONF, Projet FAC/ARRF, Bangui
- Gourlet-Fleury, S., Fayolle, A., Freycon, V., Mortier, F. (2010). Compte-rendu de mission en République Centrafricaine et en République du Congo, 10/02/2010 au 26/02/2010, 31 p. + Annexes, Cirad, Montpellier.
- Jaramillo, D.F., Dekker, L.W., Ritsema, C.J., & Hendrickx, J.M.H. (2000) Occurrence of soil water repellency in arid and humid climates. *Journal of Hydrology*, 231, 105-111.
- La Bouère de, J. (2010a). Connaitre et comprendre le sol. Formation, rôles et enjeux. DVD. Ed. Educagri
- La Bouère de, J. (2010b). Connaitre et comprendre le sol. Organisation et fonctionnement. DVD. Ed. Educagri
- Laraque, A., Freycon, V. (2011). Mise en place de piézomètres et pré-étude de la profondeur d'enracinement (RCA). 23 p. + Annexes, Ird, Cirad, Projet CoForChange, Montpellier.
- Rabaud, S. 2011. Variations spatio-temporelles de la réserve en eau du sol disponible pour les plantes. Application au Bassin du Congo. Mémoire de Master2. AgroParisTech, Ecole Normale Supérieure. 41 p.
- Wonkam, C. 2011. Profondeur d'enracinement des arbres de la forêt tropicale humide. Comparaison entre deux types de sols de la République centrafricaine. Mémoire de Master1. Université de Montpellier. 41 p.

Liste des Annexes

Annexe 1 – Calendrier de la mission

Annexe 2 – Etudiants ayant suivi la formation en pédologie

Annexe 3 – Contenu de la formation en pédologie

Annexe 4 – Evaluation des connaissances acquises durant la formation en pédologie

Annexe 5 – Evaluation des connaissances acquises durant la formation en pédologie (Correction)

Annexe 6 – Articles choisis par les étudiants pour rédiger un résumé

Annexe 7 – Evaluation de la formation en pédologie

Annexe 8 – Variation de la teneur en eau mensuelle des profils Pr4 et Pr7 et comparaison avec les teneurs en eau à la capacité au champ (θ_{pF2}) et au point de flétrissement ($\theta_{pF4.2}$)

Annexe 9 – Echantillons de sols prélevés durant la mission en vue d'analyses au laboratoire d'analyses de sols du Cirad, Montpellier

Annexe 10 – Echantillons de sols prélevés durant la mission en vue d'analyses à l'Isem

Annexe 11 – Relevés GPS de la parcelle de 0,25 ha mise en place sur la colline de Gbaza-bangui

Annexe 1 – Calendrier de la mission

Mercredi 24 octobre 2012. Trajet Montpellier / Paris / Bangui.

Jeudi 25 octobre 2012. Trajet Bangui → Mbaiki. Mbaiki : Fosse 2 : essai de relevé de racines.

Vendredi 26 octobre 2012. Mbaiki : Fosses Pr7 et Pr4 : prélèvements de sols en vue de mesures de 13C et de densité apparente. Fosse 2 : essai de relevé de racines. Analyse des données du suivi mensuel de la teneur en eau.

Samedi 27 octobre 2012. Mbaiki : Fosses Pr7 et Pr4 : prélèvements de sols en vue de mesures de la réserve en eau du sol. Aperçu des sols de plantations de Teck. Trajet Mbaiki → Bangui.

Dimanche 28 octobre 2012. Aide à la mise en place d'une parcelle permanente dans la forêt de Gbazabangui. Analyse de données du suivi de la teneur en eau et de la hauteur des nappes. Appui à Fidèle Baya en vue de sa présentation au comité de pilotage du projet ARF.

Lundi 29 octobre 2012. Essai d'installation d'une station météorologique avec F. Lanckriet et S. Gourlet-Fleury. Formation de pédologie : Cours n° 1, 2 et 3.

Mardi 30 octobre 2012. Formation de pédologie : Cours n°3, 4, 5, 6 et 7. Préparation du sujet d'examen.

Mercredi 31 octobre 2012. Rédaction rapport de mission. Déjeuner avec C. Gounel, X. Hénaut. Formation pédologie : correction de l'examen.

Jeudi 1 novembre 2012. Trajet Bangui → Paris → Montpellier

Annexe 2 – Etudiants ayant suivi la formation en pédologie

Mastère M1 « Biodiversité », Université de Bangui, Année scolaire 2011-2012

Joycksin David AZOUGBIANDO

Christ Carmel BANDAKETTE

Orphé BERKOULA

Dieu Béni BOMBOGNA-NGA-BOMATIMA

Riviérez Gorboz GNEHINGO

Sandra Marlène KONZHY-MAMADOU

Francis-Junior NGANAGIARA

Thibaut SIALO

Huguette Mélodie Fabienne YEHO

Sylvania Liliane YETINZAPA

Mastère M21 « Biodiversité », Université de Bangui, Année scolaire 2011-2012

Elodie Annette HONDET

Yolène Rilléa KOUAGOU YAYORO

Annexe 3 – Contenu de la formation en pédologie

Cours de pédologie, Année scolaire 2011-2012
Université de Bangui, Mastère 1 « Biodiversité »
Plan du cours, volume horaire 12h (+ 4h terrain)
(Version finale, V. Freycon, CIRAD)
En italique = partie non traitée

1. Introduction

- Définitions du sol
- Les fonctions du sol
- Les trois phases de formation : altération, incorporation matière organique, transfert de matière
- Plan du cours

2. Les constituants du système-sol

- Les constituants minéraux
- Les constituants organiques
- Le complexe argilo-humique
- Les êtres vivants

DVD 1 « Connaitre et comprendre le sol : Formation, rôles et enjeux »

3. Les propriétés du sol

- Vision du physicien (granulométrie et triangle de texture, structure et porosité, réserve en eau du sol, air)
- Vision du chimiste (pH, surface, charges, complexe d'échange, oxydo-réduction)
- Vision du naturaliste (couleur, texture, structure, éléments grossiers, racines ; horizons)
- Etude d'un sol : démarche
- Analyses de données : Figures teneur en carbone en fonction de la profondeur, relations teneur en argile et en carbone.

DVD 2 « Connaitre et comprendre le sol : Organisation et fonctionnement »

4. Le sol, un milieu vivant

- Incorporation et transformation de la matière organique
- Pédoturbation et pédoplasation
- Altération des roches, réduction du fer
- Ecologie microbienne : symbiose bactéries-racines et champignons-racines
- Cycles du carbone et de l'azote

5. Le sol et la nutrition des plantes

- *Le système racinaire (Fonctions, déterminants de la profondeur d'enracinement)*
- La nutrition des plantes (origine des constituants de la plante, Lois de la nutrition, disponibilité d'un élément).
- Le phosphore

6. Formation, évolution, classification et répartition mondiale des sols

- Les facteurs de la pédogénèse
- L'acidification des sols
- *Classification des sols (CPCS, Référentiel pédologique, Soil taxonomy, WRB)*
- Les sols tropicaux et de RCA

7. Le sol et l'Homme

- Changement d'usage et modification des sols (déforestation)
- Bonne gestion des sols par l'homme (terra preta, cultures associées, ...)
- Dégradation des sols par l'Homme (érosion de sols, ...)

8. L'histoire géologique de l'Afrique centrale

9. La structure d'un article

- *Structure générale*
- *Introduction*

Terrain (forêt de Gbazabangui, Université)

- Se positionner sur le globe terrestre (coordonnées géographiques Longitude et latitude) et sur un plan (coordonnées métriques)
- Se positionner avec un GPS : imprécision de la mesure
- Pente : unités degré et %
- Les grandes phases de la formation d'un sol observées sur le terrain
- Description d'un sol : Couleur, texture, structure, éléments grossiers, racines
- Détermination de la couleur avec le code Munsell

Annexe 4 – Sujet d'examen donné aux étudiants pour évaluer leurs connaissances acquises durant la formation en pédologie

Université de Bangui, M1 « Biodiversité Végétale »
Module de pédologie, V. Freycon (Cirad, Montpellier), Année 2011-2012
Examen du 31 octobre 2012

1. Evaluation des connaissances acquises en cours

(12 questions, 12 points. Réponses courtes demandées!!)

- 1.1. Quelles sont les 3 grandes étapes nécessaires à la formation d'un sol ?
- 1.2. Quelles sont les grandes fonctions d'un sol ?
- 1.3. Parmi les éléments majeurs des roches, quels sont les ions les plus solubles dans l'eau ? Les moins solubles ?
- 1.4. Quelle est la définition des classes granulométriques argile, limon et sables ?
- 1.5. Pourquoi, dans les sols, seulement une partie de l'eau est-elle disponible pour les plantes ?
- 1.6. D'où provient l'acidité d'un sol ?
- 1.7. Aux pH habituels de la majorité des sols tropicaux, quels sont les constituants du sol :
 - qui sont chargés négativement et qui permettent l'échange de cations avec la solution du sol ?
 - qui sont chargés positivement et qui permettent l'échange d'anions avec la solution du sol ?
- 1.8. Quel est l'avantage pour une Fabacées que ses racines soient en symbiose avec des bactéries Rhizobium ? Quel est l'avantage pour un végétal que ses racines soient en symbiose avec des mycorhizes ?
- 1.9. Quels sont les principaux facteurs de formation d'un sol qui conduisent à leur diversité ?
- 1.10. Pourquoi, dans les sols tropicaux, seulement une partie du phosphore total est-elle disponible pour les plantes ?
- 1.11. Dans un vieux sol tropical, le phosphore disponible pour les plantes est-il en quantité plus importante quand le sol est inondé ou bien quand le sol n'est pas inondé ? Pourquoi ?
- 1.12. Quelles sont les principaux facteurs qui favorisent l'érosion hydrique d'un sol ?

2. Evaluation des connaissances acquises sur le terrain

(5 questions. Cette partie correspondra à la note du TP terrain. Réponses courtes demandées).

- 2.1. Pour décrire un sol sur le terrain, quels sont les principaux paramètres à prendre en compte ?
- 2.2. Quels sont les principaux constituants d'un sol qui déterminent sa couleur ?
- 2.3. Qu'utilise-t-on pour donner de manière objective une couleur à un sol ?
- 2.4. Sous quelle forme et quelle couleur se trouve le fer :

- en conditions anaérobiques (milieu réducteur)
- en conditions aérobiques (milieu oxydant) et humides
- en conditions aérobiques et sèches

2.5. Comment reconnaît-on sur le terrain un sol argileux ? un sol sableux ?

3. Déterminants de la CEC (3 points)

La Fig. 1 représente les valeurs de la capacité d'échange cationique (CEC) en fonction de la profondeur de trois sols du Bassin du Congo qui sont sur différents substrats géologiques (grès, alluvions, micaschiste).

- 3.1. Quels sont les deux constituants majeurs du sol qui déterminent la CEC ?
- 3.2. Pourquoi observe-t-on une baisse de la CEC avec la profondeur, notamment dans les 20-30 premiers centimètres ?
- 3.3. Pourquoi les valeurs de la CEC sont-elles les plus élevées dans le sol sur micaschiste et les plus faibles dans le sol sur grès ?

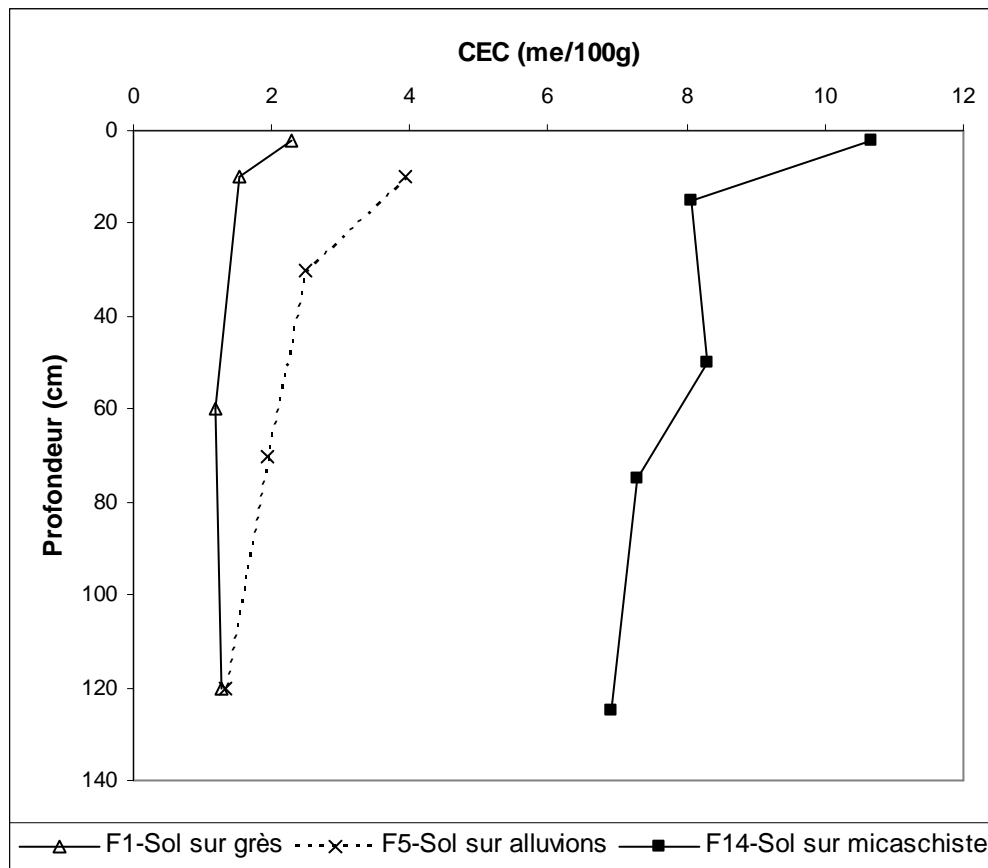


Fig. 1 : Valeurs de CEC en fonction de la profondeur sur trois sols du Bassin du Congo, provenant de l'altération de trois substrats géologiques.

4. Modification d'un sol suite à un changement d'usage (5 points)

En République Démocratique du Congo (RDC), sur des sols sableux de plateaux occupés par une savane herbeuse, un système agroforestier a été mis en place en 1990. Les différentes étapes de ce système agroforestier ont été les suivantes (Fig. 2a) :

- 1990 : plantations d'arbres de l'espèce *Acacia auriculiformis* (Fabacées).
- 2010 : Au bout de 20 ans, les *Acacia auriculiformis* ont été coupés pour produire du charbon de bois qui a été vendu à Kinshasa.
- 2011 : la parcelle a été nettoyée par le feu puis cultivée en maïs et manioc
- 2012 : récolte des cultures de maïs et manioc

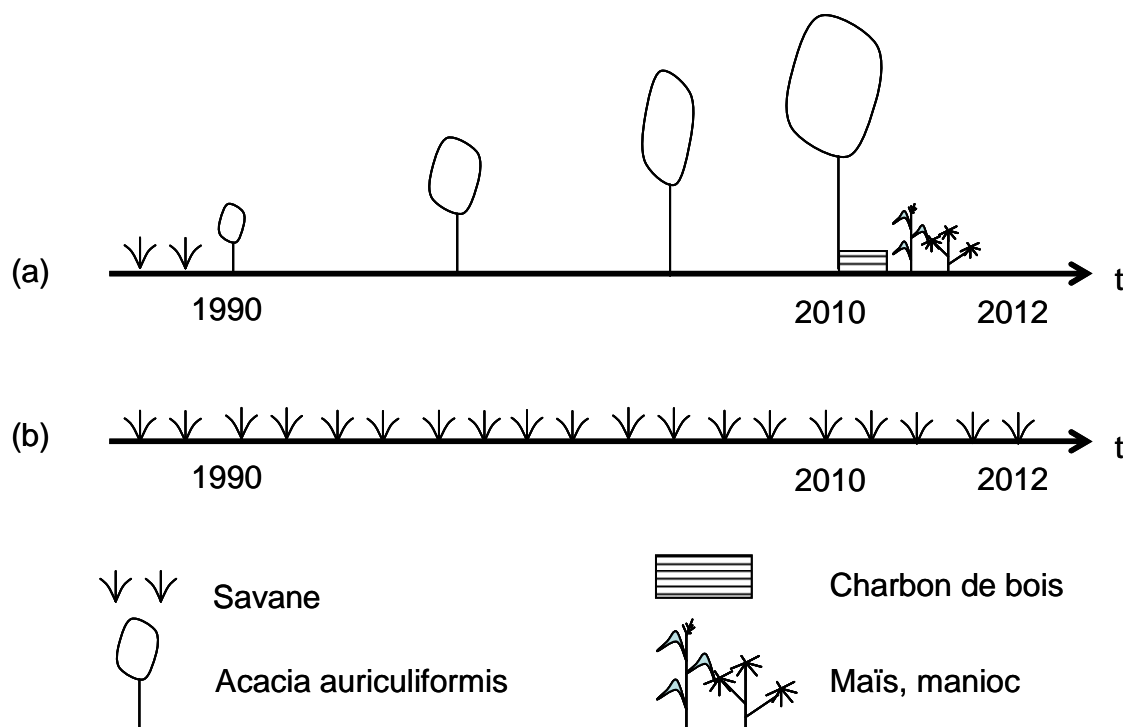


Fig. 2 : Schéma (a) d'un système agroforestier mis en place à partir d'une savane (b) d'une savane voisine laissé à l'état naturel

- 4.1. Quelles sont les principales modifications (positives et/ou négatives) attendues sur les sols de ce système agroforestier entre 1990 et 2010 dans les plantations d'arbres, par rapport à un sol-témoin d'une savane voisine qui a été laissée à l'état naturel (Fig. 2b) ?
- 4.2. Quelles sont les principales modifications (positives et/ou négatives) apportées par le feu en 2011 et la récolte des cultures en 2012 ? Quel type de plantes auriez-vous planté en association avec le maïs et le manioc pour améliorer la fertilité du sol ?

Annexe 5 – Correction du sujet d'examen donné aux étudiants pour évaluer leurs connaissances acquises durant la formation en pédologie

Université de Bangui, M1 « Biodiversité Végétale »
Module de pédologie, V. Freycon (Cirad, Montpellier), Année 2011-2012
Examen du 31 octobre 2012, **Correction**

5. Evaluation des connaissances acquises en cours

(12 questions, 12 points. Réponses courtes demandées!!)

5.1. Quelles sont les 3 grandes étapes nécessaires à la formation d'un sol ?

Altération de la roche

Incorporation et transformation de matières organiques

Transferts de matières

5.2. Quelles sont les grandes fonctions d'un sol ?

Production agricole

Fourniture de matériaux

Régulation du cycle des eaux continentales (et épuration)

Régulation des cycles biogéochimiques des éléments nutritifs (C, N)

Enregistre l'histoire des hommes et des écosystèmes

Lieu de vie et réservoir de biodiversité

Objet culturel et religieux

5.3. Parmi les éléments majeurs des roches, quels sont les ions les plus solubles dans l'eau ? Les moins solubles ?

Les plus solubles : K, Na, Ca, Mg

Les moins solubles : Fe (III), Al, Mn

5.4. Quelle est la définition des classes granulométriques argile, limon et sables ?

Les argiles ont une taille $< 2 \mu$

Les limons ont une taille comprise entre 2μ et 50μ

Les sables ont une taille comprise entre 50μ et 2000μ

5.5. Pourquoi, dans les sols, seulement une partie de l'eau est-elle disponible pour les plantes ?

Parce que l'autre partie est liée au sol, la force de rétention de l'eau par les constituants solides du sol étant supérieure à la force de succion des plantes.

Cette eau liée est estimée par la teneur en eau au point de flétrissement (pF4.2, -15 bars).

5.6. D'où provient l'acidité d'un sol ?

Humus (acides fulviques, acides humiques)

Sécrétions racinaires

Eau de pluie chargée en $\text{CO}_2 \rightarrow$ acide faible H_2CO_3

Quand $\text{pH} < 5$, Al^{3+}

- 5.7. Aux pH habituels de la majorité des sols tropicaux, quels sont les constituants du sol :
- qui sont chargés négativement et qui permettent l'échange de cations avec la solution du sol ?
La matière organique et les argiles
 - qui sont chargés positivement et qui permettent l'échange d'anions avec la solution du sol ?
Les oxydes de fer et d'aluminium
- 5.8. Quel est l'avantage pour une Fabacées que ses racines soient en symbiose avec des bactéries Rhizobium ?
Alimentation en azote assurée grâce à la transformation par les bactéries Rhizobium de l'azote de l'air N_2 en ammonium NH_4^+
- Quel est l'avantage pour un végétal que ses racines soient en symbiose avec des mycorhizes ?
Alimentation en eau et en éléments minéraux favorisée grâce à l'extension de la surface d'échange avec la solution du sol par les mycorhizes.
- 5.9. Quels sont les principaux facteurs de formation d'un sol qui conduisent à leur diversité ?
Climat, Roche-mère, êtres vivants, topographie, temps
- 5.10. Pourquoi, dans les sols tropicaux, seulement une partie du phosphore total est-elle disponible pour les plantes ?
Parce que la majeure partie est adsorbée par les oxydes de fer.
- 5.11. Dans un vieux sol tropical, le phosphore disponible pour les plantes est-il en quantité plus importante quand le sol est inondé ou bien quand le sol n'est pas inondé ? Quand le sol est inondé
- Pourquoi ?
Quand le sol est inondé, le milieu devient réducteur, les oxydes de fer sont réduits (Fer ferreux mobile), les anions phosphates qui étaient adsorbés sur ces oxydes de fer (donc non disponibles pour la plante) sont libérés dans la solution du sol et deviennent disponibles pour la plante
- 5.12. Quelles sont les principaux facteurs qui favorisent l'érosion hydrique d'un sol ?
Couverture du sol (sol nu : labour vs sol couvert : forêt, mulch protecteur)
Sensibilité du sol (texture, richesse en matière organique)
Pente (angle et longueur)
Érosivité des pluies (intensité et durée)

6. Evaluation des connaissances acquises sur le terrain
(5 questions. Cette partie correspondra à la note du TP terrain. Réponses courtes demandées)

- 6.1. Pour décrire un sol sur le terrain, quels sont les principaux paramètres à prendre en compte ?
Couleur, texture, structure, éléments grossiers, racines
- 6.2. Quels sont les principaux constituants d'un sol qui déterminent sa couleur ?
Matière organique et fer
- 6.3. Qu'utilise-t-on pour donner de manière objective une couleur à un sol ?
Code Munsell
- 6.4. Sous quelle forme et quelle couleur se trouve le fer :
- en conditions anaérobiques (milieu réducteur) : gris-vert, gris-bleu
- en conditions aérobiques (milieu oxydant) et humides : jaune
- en conditions aérobiques et sèches : rouge
- 6.5. Comment reconnaît-on sur le terrain un sol argileux ?
Colle à l'état humide, possible de faire un boudin, très dur à l'état sec.
un sol sableux ?
Gratte, impossible de faire un boudin

7. Déterminants de la CEC (3 points)

La Fig. 1 représente les valeurs de la capacité d'échange cationique (CEC) en fonction de la profondeur de trois sols du Bassin du Congo qui sont sur différents substrats géologiques (grès, alluvions, micaschiste).

7.1. Quels sont les deux constituants majeurs du sol qui déterminent la CEC ?

La matière organique et les argiles minéralogiques qui contribuent à la formation du complexe argilo-humique, responsable de la CEC.

7.2. Pourquoi observe-t-on une baisse de la CEC avec la profondeur, notamment dans les 20-30 premiers centimètres ?

Parce que la matière organique est surtout concentrée dans les horizons superficiels.

7.3. Pourquoi les valeurs de la CEC sont-elles les plus élevées dans le sol sur micaschiste et les plus faibles dans le sol sur grès ?

Parce que les sols sur micaschiste conduisent à des sols riches en argiles, au contraire des sols sur grès qui conduisent à des sols sableux pauvres en argiles.

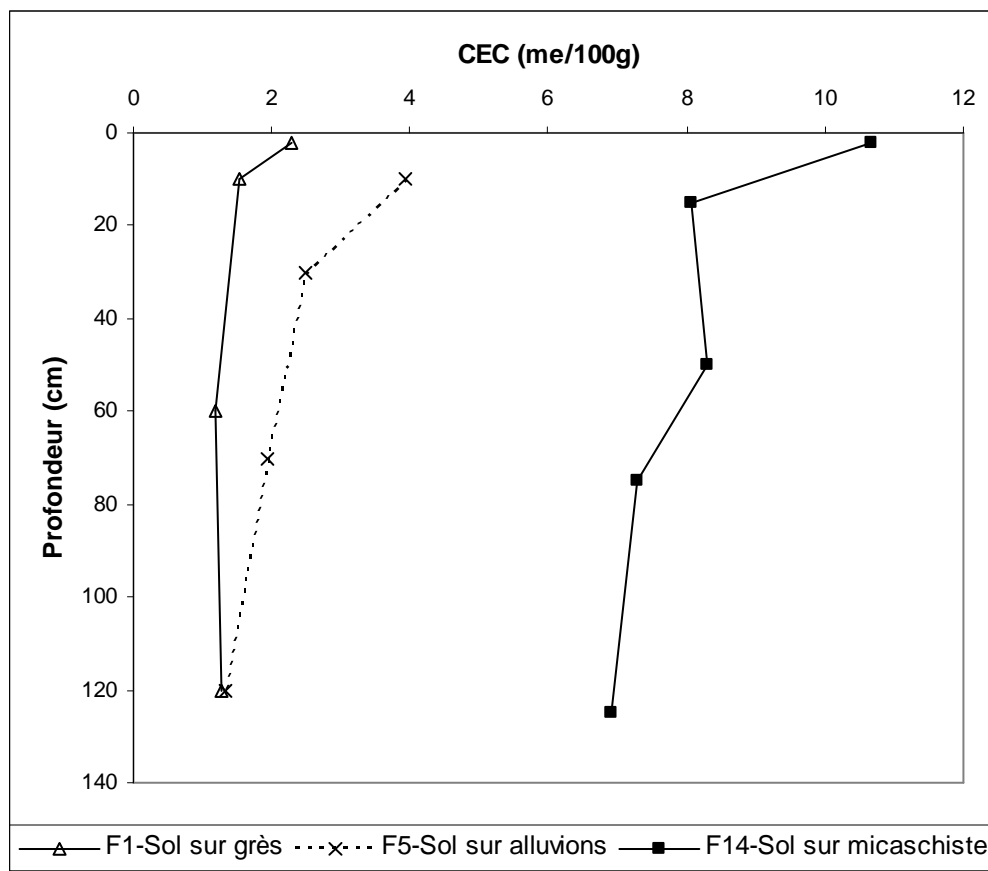


Fig. 1 : Valeurs de CEC en fonction de la profondeur sur trois sols du Bassin du Congo, provenant de l'altération de trois substrats géologiques.

8. Modification d'un sol suite à un changement d'usage (5 points)

En République Démocratique du Congo (RDC), sur des sols sableux de plateaux occupés par une savane herbeuse, un système agroforestier a été mis en place en 1990. Les différentes étapes de ce système agroforestier ont été les suivantes (Fig. 2a) :

- 1990 : plantations d'arbres de l'espèce *Acacia auriculiformis* (Fabacées).
- 2010 : Au bout de 20 ans, les *Acacia auriculiformis* ont été coupés pour produire du charbon de bois qui a été vendu à Kinshasa.
- 2011 : la parcelle a été nettoyée par le feu puis cultivée en maïs et manioc
- 2012 : récolte des cultures de maïs et manioc

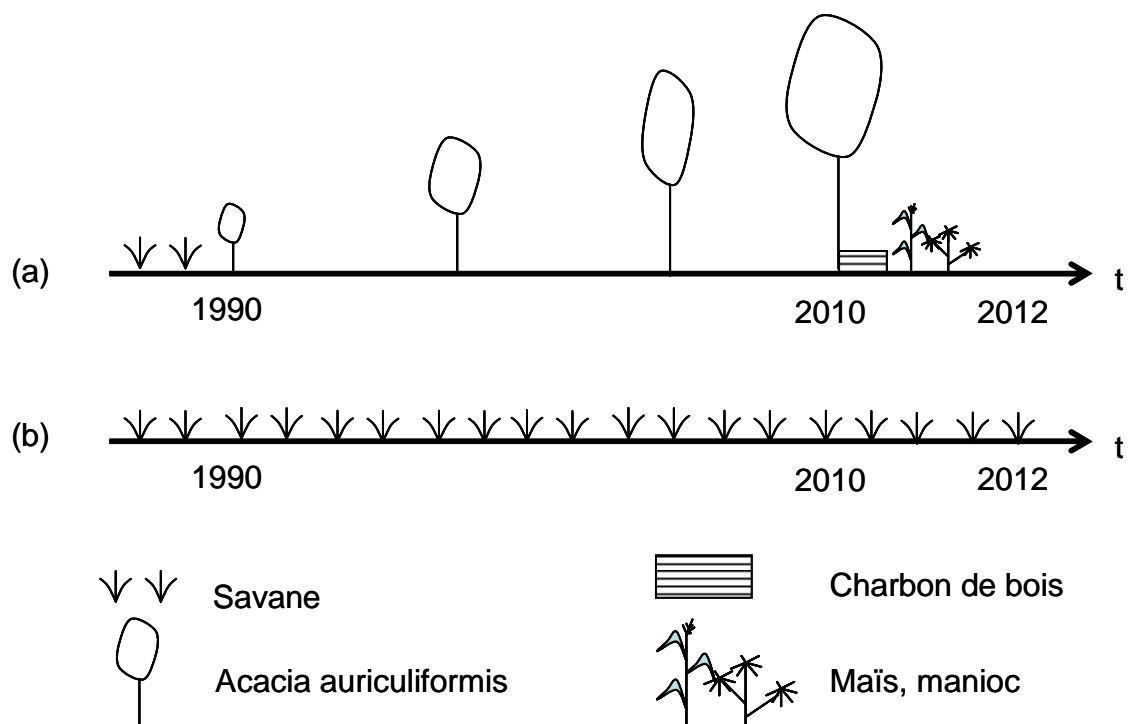


Fig. 2 : Schéma (a) d'un système agroforestier mis en place à partir d'une savane (b) d'une savane voisine laissé à l'état naturel

8.1. Quelles sont les principales modifications (positives et/ou négatives) attendues sur les sols de ce système agroforestier entre 1990 et 2010 dans les plantations d'arbres, par rapport à un sol-témoin d'une savane voisine qui a été laissée à l'état naturel (Fig. 2b) ?

Les arbres apportent davantage de matière organique au sol. Cette matière organique se transforme en acides (→ pH diminue) et en humus stable (→ augmentation de la teneur en C et par conséquent de la CEC). Le taux de saturation diminue.

Acacia auriculiformis (Fabacées) capte l'azote de l'air et le transforme sous forme de nitrates dans le sol (→ augmentation de la teneur en N).

La matière organique apportée au sol favorise le développement des vers de terre → meilleure structure du sol et infiltration, meilleure réserve en eau du sol.

- 8.2. Quelles sont les principales modifications (positives et/ou négatives) apportées par le feu en 2011 et la récolte des cultures en 2012 ?

Feu :

- croute en surface et sol nu → sol davantage soumis à l'érosion : augmentation de ruissellement et de la perte des éléments fins
- apports de cendres (= bases (K, Mg, ...) libérées de la matière organique, conduisant à une remontée du pH et des bases échangeables.

Récolte des cultures : exportations d'éléments minéraux → diminution des bases échangeables

Quel type de plantes auriez-vous planté en association avec le maïs et le manioc pour améliorer la fertilité du sol ?

Une Fabacées, par exemple arachide ou niébé, pour apporter de l'azote dans le système grâce à l'association symbiotique avec Rhizobium.

Annexe 6 – Articles choisis par les étudiants pour rédiger un résumé

**Université de Bangui, M1 « Biodiversité Végétale »
Module de pédologie, V. Freycon (Cirad, Montpellier), Année 2011-2012**

Introduction d'articles

- Sarcinelli et al. 2009. Propriétés chimiques, physiques et micromorphologiques des termitières au Brésil
(Etudiants : D.B. Bombogna et S. Konzhy-Mamadou)
- Zinn et al. (2005) Relations entre C et texture
(Etudiant : F.-J. Nganagiara)
- Eusterhues et al. (2003) Stabilisation de la matière organique
(Etudiants : F. Yeho et S. Yetinzapa)
- Lehmann et al. (2003) Terra preta
(Etudiants : C.C. Bandakette et O. Berkoula)

Articles « grand public » de vulgarisation scientifique

- « Une collaboration inattendue » Sciences au Sud. Le journal de l'IRD, n°64, avril/mai 2012
(Etudiants : R. Gnehingo et T. Sialo)
- « Réhabiliter les terres érodées au Mexique », Sciences au Sud. Le journal de l'IRD, n°64, avril/mai 2012
(Etudiant : J. D. Azougbiando)

Annexe 7 – Evaluation par les étudiants de la formation en pédologie

Université de Bangui, M1 « Biodiversité végétale »
Cours de pédologie, V. Freycon (CIRAD, Montpellier), Année 2011-2012
Evaluation du cours par les étudiants, 31 octobre 2012

Donner une note de 1 à 4 sur les différents cours

Cours	Note
N°1 (Introduction)	
N°2 (Les constituants du sol)	
N°3 (Les propriétés du sol)	
N°4 (Le sol vivant)	
N°5 (Sol et nutrition des plantes)	
N°6 (Formation, sols tropicaux)	
N°7 (Le sol et l'Homme)	
TP terrain	
Examen, contrôle des connaissances	

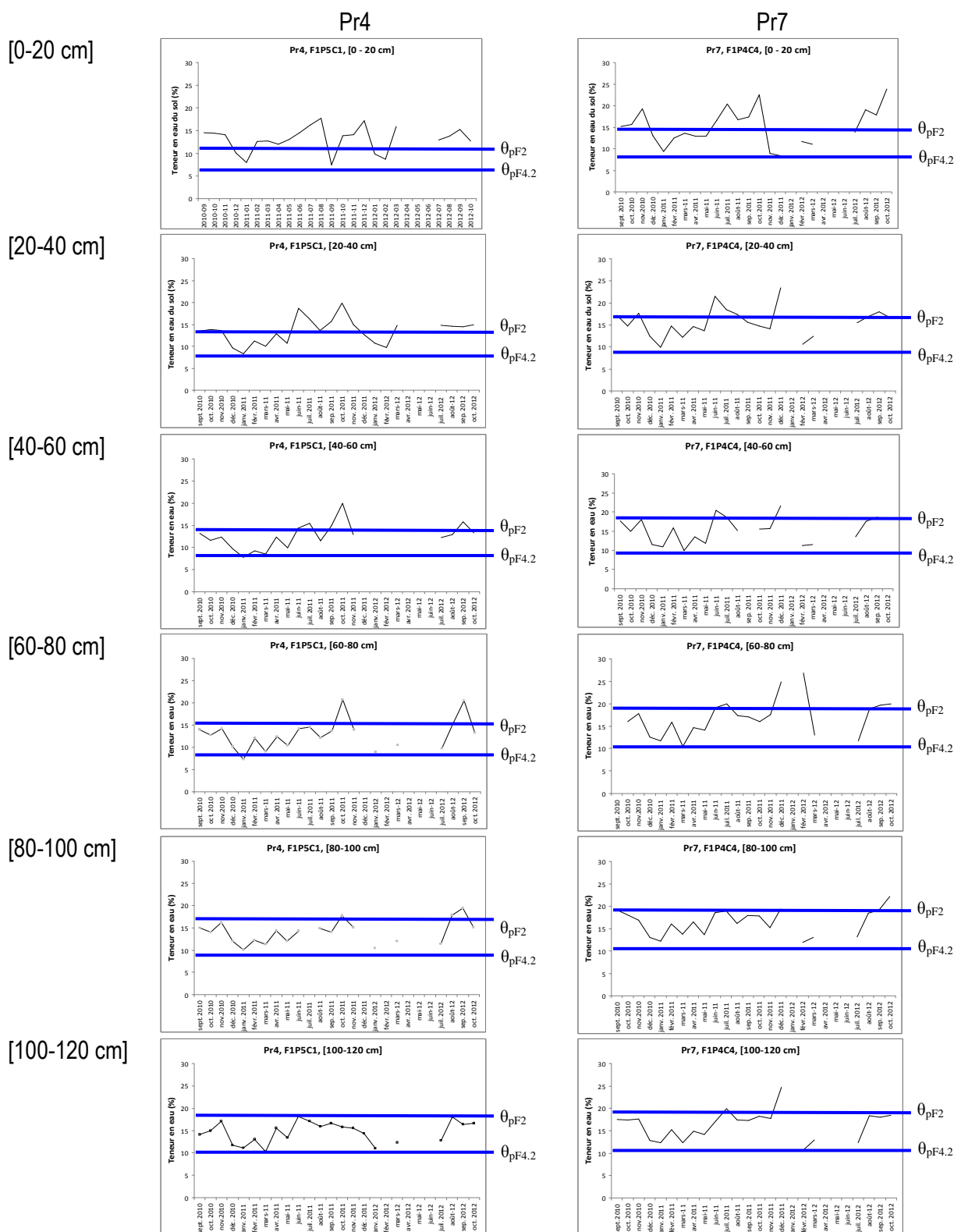
1 : Très bien ; 2 : Bien ; 3 : Moyen ; 4 : Pas terrible

Globalement, comment avez-vous trouvé la formation ?

Avez-vous apprécié les DVD ?

Quelles modifications sont à apporter pour améliorer ce cours ?

Annexe 8 – Variation de la teneur en eau mensuelle des profils Pr4 et Pr7 et comparaison avec les teneurs en eau à la capacité au champ (θ_{pF2}) et au point de flétrissement ($\theta_{pF4.2}$)



Annexe 9 – Echantillons de sols prélevés durant la mission en vue d'analyses au laboratoire d'analyses de sols du Cirad, Montpellier

Echantillons prélevés le 26 octobre 2012 avec un cylindre de volume = 100 cm³
(diamètre = 5 cm ; hauteur = 5,1 cm) pour mesurer la **densité apparente du sol**
Echantillons transmis au labo du Cirad le 21 novembre 2012 (dossier 12S134)

Id_labo	Id_labo	Lieu	Fosse	Profondeur	Répétitions
12S134-01	1	Mbaiki	Pr7	0-5 cm	1
12S134-02	2			0-5 cm	2
12S134-03	3			0-5 cm	3
12S134-04	4			10-15 cm	1
12S134-05	5			10-15 cm	2
12S134-06	6			10-15 cm	3
12S134-07	7			20-25 cm	1
12S134-08	8			20-25 cm	2
12S134-09	9			20-25 cm	3
12S134-10	10			30-35 cm	1
12S134-11	11			30-35 cm	2
12S134-12	12			30-35 cm	3
12S134-13	13			60-65 cm	1
12S134-14	14			60-65 cm	2
12S134-15	15			60-65 cm	3
12S134-16	16	Mbaiki	Pr4	0-5 cm	1
12S134-17	17			0-5 cm	2
12S134-18	18			10-15 cm	1
12S134-19	19			20-25 cm	1
12S134-20	20			30-35 cm	1
12S134-21	21			60-65 cm	1

Annexe 9 – Echantillons de sols prélevés durant la mission en vue d'analyses au laboratoire d'analyses de sols du Cirad, Montpellier (suite et fin)

Echantillons **non perturbés vs perturbés** prélevés le 27 octobre 2012 pour mesurer la **teneur en eau au point de flétrissement (pF4.2) et à la capacité au champ (pF2)**

Echantillons transmis au labo du Cirad le 21 novembre 2012 (dossier 12S134)

Id_labo	Id_sachet	Lieu	Fosse	Echantillon	Profondeur	Analyses			
						pF2	pF4.2	Granulo	C
12S134-22	1	Mbaiki	Pr7	Non perturbé	0-5 cm	X	X		
12S134-23	2			Non perturbé	10-15 cm	X	X		
12S134-24	3			Non perturbé	20-25 cm	X	X		
12S134-25	4			Non perturbé	30-35 cm	X	X		
12S134-26	5			Non perturbé	60-65 cm	X	X		
12S134-27	6	Mbaiki	Pr4	Non perturbé	0-5 cm	X	X		
12S134-28	7			Non perturbé	10-15 cm	X	X		
12S134-29	8			Non perturbé	20-25 cm	X	X		
12S134-30	9			Non perturbé	60-65 cm	X	X		
12S134-31	10	Mbaiki	Pr7	Perturbé	0-5 cm	X	X	X	X
12S134-32	11			Perturbé	10-15 cm	X	X	X	X
12S134-33	12			Perturbé	20-25 cm	X	X	X	X
12S134-34	13			Perturbé	30-35 cm	X	X	X	X
12S134-35	14			Perturbé	60-65 cm	X	X	X	X
12S134-36	15	Mbaiki	Pr4	Perturbé	0-5 cm	X	X	X	X
12S134-37	16			Perturbé	10-15 cm	X	X	X	X
12S134-38	17			Perturbé	20-25 cm	X	X	X	X
12S134-39	18			Perturbé	60-65 cm	X	X	X	X

Annexe 10 – Echantillons de sols prélevés durant la mission en vue d'analyses à l'Isem

Echantillons prélevés le 26 octobre 2012 pour mesurer la **composition isotopique du carbone du sol ($\delta^{13}\text{C}$)**

Echantillons transmis le 21 novembre 2012 à l'Isem.

Id_labo	Lieu	Forêt/Parcelle	Fosse	Profondeur
1	Mbaiki	F1P4	Pr7	0-5 cm
2				10-15 cm
3				20-25 cm
4				30-35 cm
5				40-45 cm
6				50-55 cm
7				60-65 cm
8				70-75 cm
9				80-85 cm
10				100-110 cm
11	Mbaiki	F1P5	Pr4	0-5 cm
12				10-15 cm
13				20-25 cm
14				30-35 cm
15				40-45 cm
16				50-55 cm
17				60-65 cm
18				70-75 cm
19				80-85 cm
20				100-110 cm

Annexe 11 – Relevés GPS de la parcelle de 0,25 ha mise en place sur la colline de Gbaza-bangui

Référentiel : WGS84

Modèle : Garmin GPSmap 60CSx

Point	Rép.	Heure	Coordonnées projetées, UTM33N		Coordonnées géographiques	
			X	Y	Latitude	Longitude
Côté (0, 0)	1	11h16	232190	483683	4,37205	18,58699
Côté (50, 0)	1	8h14	232207	483687	4,3721	18,58714
	2	11h11	232235	483683	4,37206	18,5874
	3	11h28	232231	483686	4,37208	18,58736
Côté (0, 50)	1	11h20	232189	483740	4,37257	18,58698
Côté (50, 50)	1	11h25	232223	483726	4,37245	18,58729